



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA
INGENIERIA MECANICA**

**Análisis Exergético en Torres de Enfriamiento en la Central
Geotérmica San Jacinto – Tizate.**

AUTOR

Br. Franklin Javier Tórrez Ríos

TUTOR

Ing. Donald Pérez Palma.

Managua, 1 de Diciembre de 2015.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Industria

DECANATURA

A: Brs. Franklin Javier Tórrez Ríos
DE: Facultad de Tecnología de la Industria
FECHA: Jueves 20 de Agosto del 2015

Por este medio hago constar que su trabajo de Investigación Titulado **"Análisis Exergético en Torres de Enfriamiento en la Central Geotérmica San Jacinto - Tizate"**. Para obtener el título de Ingeniero Mecánico, y que contara con el Ing. Donald Pérez Palma, Como profesor guía, ha sido aprobado por esta Decanatura por lo que puede proceder a su realización.

Cordialmente,

Ing. Daniel Cuadra Horney
Decano



C/c Archivo

Managua, 20 de Junio del 2015

Ingeniero Daniel Cuadra.
Decano de FTI

Estimado Ing. Cuadra:

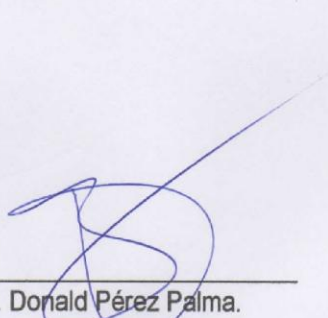
El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que estoy tomando la responsabilidad de servir como tutor, en la elaboración de la tesis de titulada **“Análisis Exergético en Torres De Enfriamiento Central Geotérmica San Jacinto – Tizate”**, que será elaborada por el bachiller:

Br. Franklin Javier Torrez Rios 2010 – 33012

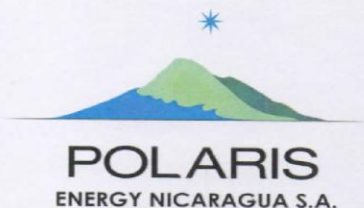
Cabe señalar que dicho protocolo ya fue sometido a revisión por parte del departamento de energética de la facultad.

Sin más que hacer referencia de suscribo de usted.

Atentamente,




Ing. Donald Pérez Palma.
Docente de UNI – RUPAP



CONSTANCIA

Por medio de la presente hago constar que el **Br. Franklin Javier Torrez Rios**, estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), quien se identifica con número de cédula **(281-051292-0008K)** está realizando su trabajo de tesis bajo el tema "Análisis Exergético en Torres de Enfriamiento Central Geotérmica San Jacinto Tizate" en el área de Ingeniería de Planta desde el 20 de abril del año dos mil quince.

A solicitud de la parte interesada y para los fines que estime conveniente se extiende la presente, en la ciudad de León, a los tres días del mes de junio del año dos mil quince.



Lic. Johnny Bendaña Carrión
Gerente Admin. y de Recursos Humanos



Edificio PROCREDIT Cuarto Piso
Av. Jean Paul Genie
Managua, Nicaragua

Oficina Planta San Jacinto Tizate
Km 114 Carretera Malpaisillo
León, Nicaragua

PBX: (505) 2253 8340
Tel SJT: (505) 22538342/43
Fax: (505) 2253 8340



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Industria

SECRETARÍA DE FACULTAD

F-8: CARTA DE EGRESADO

El Suscrito Secretario de la **FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA** hace constar que:

TÓRREZ RIOS FRANKLIN JAVIER

Carne: **2010-33012** Turno **Diurno** Plan de Estudios **972A** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, es **EGRESADO** de la Carrera de **INGENIERÍA MECANICA**.

Se extiende la presente **CARTA DE EGRESADO**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los veinte y dos días del mes de septiembre del año dos mil quince.

Atentamente,

Ing. Wilmer José Ramírez Velásquez
Secretario de Facultad



AGRADECIMIENTO.

Doy gracias a Dios todo poderoso por darme la vida, la salud y la fuerza para que necesité para poder culminar con la elaboración de este proyecto. A la empresa Polaris Energy Nicaragua S.A por darme la oportunidad de realizar mi proyecto en sus instalaciones.

También quiero agradecerle profundamente a mí a Madre por apoyarme en todo y fomentar mi deseo de superación, a una persona muy especial que estuvo conmigo siempre, aconsejarme y dándome ánimos cuando más necesite de su apoyo.

Mis más sincero agradecimiento a mi tutor Ing. Donald Palma por su paciencia, por su atenta colaboración en este trabajo, a todos los profesores que me ayudaron con sus aportaciones y comentarios en todo el proceso de elaboración de mi proyecto.

DEDICATORIA.

La presente tesis la dedico primeramente a nuestro señor Jesucristo, quien me dio salud, paciencia, sabiduría para terminar con éxito mis estudios,

A mi abuela la cual fue como mi segunda madre quien me apoyó cuando iniciaba a dar mis primeros pasos en la educación.

A mis profesores los cuales me facilitaron las herramientas necesarias para crear conocimiento los cuales me fueron y me serán muy útiles en mi vida como profesional.

Quiero hacer una dedicatoria muy especial a mi madre, la cual estuvo siempre apoyándome, motivándome incondicionalmente para jamás darme por vencido y seguir adelante hasta llegar a culminar mi carrera universitaria. A mi novia por estar conmigo incondicionalmente en los momentos de inseguridad, por creer en mi capacidad de resolver los problemas.

Se la dedico también a todas aquellas personas que de cierta manera me dieron su apoyo moral, económico y espiritual.

RESUMEN.

La finalidad de este proyecto es evaluar el potencial de energía disponible que poseen las torres de enfriamiento a partir del, estado actual de funcionamiento y proponer mejoras que beneficien las condiciones de operación de la torre de enfriamiento de tiro inducido de flujo a contracorriente, para el enfriamiento de las aguas procedente de condensador situado en la planta geotérmica San Jacinto – Tizate. Atendiendo entre otros factores la eficiencia energética y su impacto sobre el medio ambiente.

Evaluamos el funcionamiento teniendo en cuenta las, condiciones de operación y mantenimiento, para ello fijamos las condiciones típicas de funcionamiento de las mismas a partir de los meses en los que se realizó el estudio.

Procedimos a comparar estas condiciones con los datos obtenidos experimentalmente y los datos de diseño. A partir de allí, recalculamos el dispositivo de enfriamiento, para determinar si existe un problema en las condiciones de operación.

A partir de las los resultados obtenidos mediante ecuaciones termodinámicas, confirmamos que las torres de enfriamiento tienen la capacidad de generar energía. Energía que actualmente es expulsada en forma de aire con una velocidad de 1.74 m/s, pero esta energía no es lo suficiente ya que representa el 0.0002% de la potencia instalada en la planta.

NOMENCLATURA

A = área de arrastre, m^2 .

A_p : caudal de aporte, m^3/s .

A_r : Caudal de arrastre, m^3/s .

C = Calor específico en, $J/Kg\ K$.

C_p = Coeficiente de calor específico a presión constante, $J/kg\ K$.

E : Caudal de evaporación, m^3/s .

E : Caudal de evaporación, m^3/s .

\dot{E}_{heat} = Transferencia total de Exergía.

g = Gravedad m/s^2 .

G = Flujo de aire en m^3/s .

h_1 = Entalpía de entrada en, J/kg .

h_2 = Entalpía de salida en, J/kg .

Δh = Diferencia de entalpía, KJ/kg .

M = Masa molar del aire, kg/mol .

\dot{m} = Flujo másico en, kg/s .

P_g : Caudal de purga, m^3/s .

P = Presión absoluta, Pa .

P_o = Presión atmosférica, atm .

P_s = Presión de vapor de agua saturación, Pa .

P_v = Presión de vapor real del aire y agua, Pa .

Q = Caudal, m^3/s ,

$Q_{entrada}$ = Calor de entrada, kJ/h .

Q_x = Calor transferido, kJ .

Q_{tr} = Transferencia de energía por unidad de volumen (W/m^3).

R_{aire} = Constante universal del aire, $J/Kg\ K$.

R = Rango de temperatura, $^{\circ}C$.

T_0 = Temperatura de ambiente, K .

T = Temperatura, °C.

T_{bs} = Temperatura de bulbo seco, °C, K.

T_{bh} = Temperatura de bulbo húmedo, °C, K.

T_{lim} = Temperatura límite o aproximación, °C, K.

T_2 = Temperatura de entrada en °C.

T_1 = Temperatura de salida en °C.

V = Velocidad del fluido, m/s.

V = Volumen de aire, m³.

v = Volumen específico, m³/kg.

V_h = Volumen Húmedo, m³/kg aire.

W = Trabajo en, W.

w = Humedad saturada, kg de vapor/kg de aire seco.

\dot{X} = Exergía, kJ

\dot{X}_{dest} = destrucción de la exergía, kJ/min.

Y = Humedad relativa, g/m³.

ρ_{aire} = Densidad, kg/m³.

ρ_{agua} = Densidad, kg/m³.

INDICE

AGRADECIMIENTO.	6
DEDICATORIA.	7
RESUMEN.	8
NOMENCLATURA	9
INTRODUCCIÓN.	13
ANTECEDENTES.	14
JUSTIFICACIÓN.	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	17
OBJETIVOS.	18
HIPÓTESIS.	19
DISEÑO METODOLOGICO.	20
Tipo de Investigación.	20
Variable del Estudio.	20
1. MARCO TEÓRICO.	21
1.1 Energía Geotérmica.	22
1.2 Campo Geotérmico.	22
1.2.1 Clasificación Según la temperatura del Agua.	23
1.3 Exergía o Estado Muerto.	23
2. Torres de enfriamiento.	24
2.1 Introducción.	24
2.2 Generalidades de un sistema de refrigeración industrial.	25
2.3 Tipos de torres de enfriamiento.	26
2.3.1 Torres de Tiro Natural o Hiperbólicas	26
2.3.2 Torres de Tiro Mecánico	27
2.3.3 Características de las Torres de Tiro inducido.	29
2.4 Factores que afectan el rendimiento de una Torre de Enfriamiento.	30
2.5 Condiciones actuales de la torre de enfriamiento.	31
2.6 Materiales de construcción de una torre de tiro inducido a contra flujo.	35
3. Funcionamiento de la Torre.	37

3.1	Sistema de Refrigeración.	37
3.1.1	Condiciones de Diseño.	37
3.1.2	Característica general de la torre.	37
3.1.3	Pérdidas de agua (% caudal circulante).	37
4.	Conceptos.	37
4.1	Conceptos Teóricos.	38
4.1.1	Balance de macroscópico de Materia	39
4.1.2	Balance de materia y energía.	40
5.	Intercambiadores de calor.	42
5.1	Tipos de intercambiadores de Calor.	43
6.	VENTILADORES	46
6.1	Generalidades.	46
6.2	Clasificación.	46
6.2.1	Ventiladores axiales	47
6.2.2	Componentes del ventilador axial.	48
7.	Condensación.	49
7.1	Definición de agua Condensada.	49
7.2	Proceso del condensado.	50
7.3	Licuación o Licuefacción.	51
8.	Gases no Condensables.	51
8.1	Efectos de los GNC en el Sistema.	52
9.	Fluido Circulante.	53
9.1	Parámetros de circulación.	53
9.2	Tratamiento del agua.	54
10.	Conclusiones.	65
11.	Recomendaciones.	66
ANEXOS		67
12.	Bibliográficas.	77

INTRODUCCIÓN.

Esta investigación está orientada a desarrollar un análisis exergético en las torres de enfriamiento de la central geotérmica San Jacinto – Tizate. Con el fin de comprobar si el vapor expulsado por el ventilador de las torres de enfriamiento puede ser aprovechado para la generación de energía. Se utilizara la

La energía geotérmica ha llegado ser a una fuente de energía atractiva debido al incremento en los precios de petróleo y la preocupación sobre la contaminación del medio ambiente.

La planta geotérmica trabaja con el Ciclo de Rankine orgánico simple, usado para la generación eléctrica, procesos industriales como la calefacción y la refrigeración. El análisis Exergético es de gran relevancia en el modelo, diseño y optimización en estos tipos de ciclos.

La exergía como una propiedad termodinámica que nos permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno.

Las torres de enfriamiento forman parte de este ciclo termodinámico y tienen como principal función el intercambio de calor

El intercambio de calor en las torres de enfriamiento se define como la convección entre las gotas de agua y el aire que fluye a su alrededor. Las torres de enfriamiento que estudiaremos son del tipo tiro inducido a contra flujo.

Para realizar el análisis exergético en las torres de enfriamiento se hará mediante datos técnicos recopilados, y datos obtenidos en campo, a partir de diagramas de procesos y aplicando otras técnicas que permitan determinar el estado de operación de las torres de enfriamiento.

ANTECEDENTES.

Nicaragua ha dependido durante muchos años de la generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles, por tal motivo se han realizado estudios científicos que han demostrado que el país posee gran potencial de generación de energía a base energías renovables.

Durante los años de 1969 a 1971, fueron iniciadas investigaciones sobre la geotermia contratando los servicios de la empresa norteamericana de Texas Instruments, Inc, la cual realizó las primeras exploraciones sobre la existencia de campos geotérmicos.

Este programa fue financiado por la Agencia Internacional de Desarrollo de los Estados Unidos y fue diseñado para localizar las primeras áreas con potencial geotérmico del país.

Como resultado de dicho estudio, fueron seleccionados prioritariamente las áreas de San Jacinto – Tizate y Momotombo para su desarrollo. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) continuó los estudios en el área de Momotombo desde mediados de 1972 hasta finales de 1973.

En el año de 1973 se evaluó la necesidad de la explotación de este recurso debido a la crisis del petróleo que impactó seriamente la economía del país. Momotombo con un potencial para instalar una planta de generación de 35 MW; fue la primera en aprovechar el recurso disponible iniciando operaciones comerciales en el años de 1979, instalando una segunda con la misma capacidad en el año 1989 (Minas, s.f.)¹.

Durante el período de los años 1993-1995, la empresa Intergeoterm S.A. (Consorcio ENEL Nicaragua-Empresas Rusas) perforó siete pozos de exploración en el área geotérmica de San Jacinto-Tizate con profundidades entre 550-2000 metros, resultando tres pozos productores y un pozo inyector.

¹ Ministerio de Energía y Minas,
<http://www.mem.gob.ni/media/file/DIRECCION%20DE%20RECURSOS%20ENERGETICOS%20RENOVABLES/GEOTERMIA>

En Enero del 2001, el campo San Jacinto-Tizate fue concesionado bajo un Contrato de Explotación por un período de 25 años a la empresa Intergeoterm S.A, luego pasó a la empresa San Jacinto Power S.A. A partir del 2004, es explotado por la empresa canadiense Polaris Energy Nicaragua S.A (PENSA), la cual inició la producción de energía eléctrica en Junio de 2005 con la puesta en operación de dos unidades a contrapresión de 8 MW Neto.

En el 2013 se concluyó la Segunda Fase de expansión de la planta, **siendo su capacidad instalada de 72 MW** y actualmente la planta genera 54 MW.¹

JUSTIFICACIÓN.

Este trabajo de investigación, sobre el análisis exergético en las torres de enfriamiento tiene gran relevancia porque permitirá demostrar si las torres de enfriamiento están liberando un potencial de energía que no está siendo aprovechado, aplicando dichos conocimientos que puedan ponerse en práctica para aprovechar una posible generación de energía a base de un subproceso.

Con este estudio se pretende proponer una solución viable que ayuden con el aprovechamiento de energía de forma eficiente, y que está a su vez pueda contribuir a la generación de energía de forma limpia, aprovechando las emisiones de gas (aire) que son liberadas por la torres de enfriamiento a la atmosfera.

Es importante también destacar el aspecto ambiental, ya que esta disponibilidad de energía no contribuye al aumento del efecto invernadero con la emanación de gases.

Este documento pretende proporcionar material de apoyo que pueda ser útil para los estudiantes, docentes y la empresa misma, que deseen conocer acerca del análisis exergético en la torres de enfriamiento de una central geotérmica.

Este trabajo investigativo se desarrollará en la Central Geotérmica San Jacinto – Tizate. Este campo Geotérmico, está ubicado en la Cordillera de los Maribios, aproximadamente a 75 Km. al Noreste de la ciudad de Managua, 10 Km. al Noreste de Telica y 20 Km. al Noreste de la ciudad de León.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Uno de las dificultades que presenta nuestro país es que depende en gran parte del combustible fósil y sus derivados para la generación de energía. El consumo intenso del petróleo, perjudica seriamente el medio ambiente por la emisión de dióxido de carbono CO₂, y otros gases de efecto invernadero.

A esto se le suma el alto costo de producción de la energía eléctrica, teniendo en cuenta el índice de pobreza lo cual afecta el acceso constante a la misma generando un problema para el desarrollo de la nación.

Ante este hecho está, la opción de generar energía mediante fuentes renovables que no contribuyan a la generación de gases de efecto invernadero.

Actualmente se habla sobre disminuir la dependencia del combustible fósil y sus derivados, pero la generación de energía aún sigue siendo a base de petróleo, y según las estadísticas proporcionadas por el Ministerio de Energía y Minas (MEN), la matriz energética a base de petróleo ocupa el 51.93% y un 48.07% la comprende las fuentes renovables (renovables, 2015)²

Le empresa está interesada en identificar el potencial de aprovechamiento de la energía del aire emanado a la atmosfera. Como una forma de aprovechar el aire desechado al final de un proceso, es por ello que se desarrollará el estudio en las torres de enfriamiento para constatar si existe un recurso que pueda ser de utilidad para generar energía limpia con los gases que son emanados a la atmosfera.

² Ministerio de Energías y minas,
<http://www.mem.gob.ni/index.php?s=10&idp=887&idt=2&id=763>

OBJETIVOS.

➤ Objetivo general:

Desarrollar un estudio sobre el potencial de energía que poseen las torres de enfriamiento con el objetivo de valorar la disponibilidad de esta energía en la Central Geotérmica San Jacinto-Tizate.

➤ Objetivos Específicos:

1. Describir las condiciones de operación en las torres de enfriamiento.
2. Verificar la carga térmica a la que operan las torres de enfriamiento.
3. Calcular cantidad de exergía que es expulsada en forma de gas (aire) a la atmosfera mediante el ventilador.
4. Valorar la posibilidad de utilizar este aire para la generación de energía eléctrica mediante la turbina eólica.

HIPÓTESIS.

Las torres de enfriamiento de la planta de San Jacinto Tizate tienen la exergía necesaria para generar energía limpia con fines de autoconsumo.

DISEÑO METODOLOGICO.

El estudio a realizar se es de tipo descriptivo. Para valorar una alternativa posible para la generación de energía, se procederá a recopilar información real de las torres de enfriamiento tomada en campo; con el fin de establecer un indicador de generación. El indicador planteará la forma de generación de energía.

También se verificará si las torres de enfriamiento operan bajo condiciones de diseño, en relación a su funcionamiento de enfriar agua condensada.

Tipo de Investigación.

El estudio es meramente descriptivo, ya que se describe y analizan los diferentes factores relacionados con la operatividad de las torres de enfriamiento, enfocado en análisis del posible aprovechamiento de exergía del aire que expulsan las torres de enfriamiento y con bases a los resultados de esta fase descriptiva para determinar, si es viable, se elaborará un plan de diseño de una generador eólico para la generación de energía limpia.

Variable del Estudio.

Las variables que vamos a utilizar se muestran en la tabla N° 1.

Variable	Definición	Medida	Unidad
Flujo másico	Es la cantidad de masa que varía en el tiempo.	Cuantitativa	Kg/s
Temperatura	Es la magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo o un objeto en el ambiente.	Cuantitativa	°C , °F, °K
caudal	Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo.	Cuantitativa	m ³ /s
Entalpia	Es la magnitud que representa energía total de un sistema termodinámico, cuya variación expresa la cantidad de energía absorbida o cedida por el sistema termodinámico con su entorno.	Cualitativa	KJ/kg.

Tabla N° 1. Variables de estudio.

1. MARCO TEÓRICO.

Para el desarrollo del análisis exergético en las torres de enfriamiento en la planta geotérmica San Jacinto – Tizate, es necesario conocer el funcionamiento de la planta, como esta genera energía eléctrica a través del aprovechamiento del vapor que es extraído de una fuente llamada reservorio, siendo este la fuente para la generación de energía.

Las plantas geotérmicas son otra fuente de generación de energía renovable, que ayuda al desarrollo de la industria y también contribuye a no destruir el ecosistema, porque este en su proceso no genera gases de efecto invernadero.

El ciclo de operación de la planta no es un Ciclo Rankine convencional sino es el ORC (Organic Rankine Cycle), el ciclo empieza al aprovechar el vapor que se encuentra en el subsuelo de forma natural creado por corrientes de agua que entran en contacto con líquido magmático dando origen así al llamado reservorio Geotérmico

La generación de energía geotérmica empieza extrayendo el vapor mediante pozos profundos, que al momento que llegan a la superficie pasan por un separador ciclónico que desvía la salmuera del vapor. El vapor es trasladado mediante una red de tuberías llegando a un colector que concentra todo el vapor que pasa luego por un separador de humedad que lo que hace es extraer el remanente de agua que pueda llevar el vapor antes de ser enviado a la turbina.

Después de haber cumplido su función, el vapor que sale de la turbina pasa por el condensador que lo convierte en líquido, ya convertido en líquido es enviado a las torres de enfriamiento para bajarle la temperatura. Una vez enfriado una parte de él se usa como refrigerante para algunos equipos de la planta y el resto es re inyectado al subsuelo (ver anexo fig. 23).

Esta investigación concretará principalmente en el estudio de las torres de enfriamiento de la planta.

Ya que estas pueden proporcionar un recurso para la generación de energía, ya que este en su proceso de enfriar el condensado proveniente del condensador emanan gases a través de ventiladores, este aire podría tener algunas propiedades como presión y velocidad que pueden ser utilizadas para la generación de energía de una forma limpia; ya que no se considera que es de forma renovable porque es un subproducto que al momento de detener el proceso principal las torres y el ventilador que genera la emisión de los gases a la atmosfera se agotaría.

El aprovechamiento de este subproceso ayudaría a disminuir los costos operativos de la planta en cuestión de generación de energía.

Dicho análisis se desarrollará mediante usos de datos técnicos, cartas Psicométricas, tablas entre otros.

1.1 Energía Geotérmica.

La energía geotérmica no es más que otra forma de generar energía renovable, aprovechando el calor que se encuentra en el subsuelo de nuestro planeta, en lugares conocidos como reservorios Geotermiales (Geotérmica)².

Como se sabe en el interior de la tierra se encuentra altas temperaturas y va en aumento con la profundidad. Estas temperaturas son elevadas y a menudo a esas profundidades hay capas freáticas que cuando entra en contacto con el flujo de agua subterráneas las evapora creando reservas de vapor. Este vapor cuando asciende a la superficie aprovechando las fallas que hay en la corteza terrestre, se manifiestan en forma de géiseres o fuentes termales.

Actualmente, en este proceso se utilizan los métodos de perforación que permite la explotación de los **campos geotérmicos** para la generación de energía geotérmica.

1.2 Campo Geotérmico.

Un Campo Geotérmico³ es un sistema natural que permite la extracción de un fluido que está en el subsuelo a altas temperaturas.

Por lo tanto, las centrales geotérmicas generan electricidad a partir de la explotación de los yacimientos geotérmicos que existen en algunos lugares del planeta que forman parte del llamado círculo de fuego.

El campo geotérmico de la central geotérmica San Jacinto – Tizate ubicada en el departamento de León, cuya generación es de un promedio de más de 30 MW, consta con dos turbinas de la misma capacidad, generando en bruto 62 MW que luego es conectado a la red de electricidad del país.

Nicaragua posee un gran potencial aproximados a los 1,515 MW, en lo que se refiere a campos geotérmicos, apenas con dos campos que son explotados actualmente que son la central Momotombo a cargo de la empresa Israelí ORMAT con un promedio de generación de 23 MW según la página de la Empresa

³ Geotérmica, E. (s.f.). *tw energy*. Obtenido de <http://twenergy.com/energia/energia-geotermica>

Nicaragüense de Electricidad (ENEL) (Electricidad)⁵ y la central San Jacinto – Tizate a cargo de la empresa Polaris Energy Nicaragua⁴

1.2.1 Clasificación Según la temperatura del Agua.

Energía geotérmica de alta temperatura.

Las altas temperaturas que existen en las zonas de la corteza terrestre están comprendidas a más de 400 °C, con estas temperaturas se produce vapor en la superficie con muy poca condensación al momento de generar energía eléctrica mediante la turbina.

En el caso de la central geotérmica San Jacinto – Tizate se encuentra con las temperaturas de 350 °C medias a la salida del pozo productor.

Energía Geotérmica de temperaturas medias.

Cuando se refiere a temperaturas medias se dice, que el líquido acuífero está a temperaturas menos elevadas, estas temperaturas están entre 70 y 150 °C. Por consiguiente, hay más fase de condensación en el vapor por lo cual al momento de generar energía el rendimiento será menor.

Energía Geotérmica de bajas temperaturas.

Las bajas temperaturas se encuentran en zonas más amplias que las anteriores estas temperaturas oscilan entre 50 y 70 °C.

En el caso de la central geotérmica no se encuentra este tipo de cuenca sedimentaria, por lo cual no se utiliza este tipo de temperatura.

1.3 Exergía o Estado Muerto.

La exergía o disponibilidad⁶ es una propiedad Termodinámica que expresa la cantidad máxima de trabajo útil que se entrega a un sistema cuando sigue un proceso totalmente de un estado inicial hasta un estado muerto o cero, es decir, alcanza el equilibrio con su alrededor

Cuando la presión y la temperatura se igualan a la del entorno, la exergía es consumida en su totalidad. “Una vez que la temperatura se iguala a la del ambiente alcanza el equilibrio térmico y cuando la presión es igual a la del exterior

⁵ Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL),
http://www.enel.gob.ni/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=16&Itemid=2

⁶ Departamento de física Aplicada,
http://laplace.us.es/wiki/index.php/Introducci%C3%B3n_a_la_exerg%C3%ADa

(1 atm.) se llega al equilibrio mecánico, y ya no se puede extraer energía adicional” (Haywood, 1986)⁵.

La exergía nos da el trabajo útil que podemos extraer de un sistema, apurando al límite las posibilidades que ofrece el segundo principio de la termodinámica. Para ello, hay que suponer procesos completamente reversibles y por tanto sin producción de entropía.

En un proceso real siempre se produce entropía. La producción de entropía implica una reducción del trabajo útil que podemos extraer del sistema, es decir, cuanto mayor es la entropía menor es el aprovechamiento de su exergía.

Para el cálculo de la entropía viene dada por la ecuación:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad (\text{Ec. 1})$$

2. Torres de enfriamiento.

2.1 Introducción.

Las máquinas y los procesos industriales (Enenry, 2014)⁶, así como aquellos dedicados al confort humano, generan enormes cantidades de calor que deben ser disipadas continuamente si se quiere que este proceso opere eficientemente. Aunque hay intercambiadores naturales como lo son los ríos, lagos, arroyos y océanos, el proceso natural de evaporación los hace muy efectivos pero sin control, debido a su superficie fija o a veces variable que los contiene y su total dependencia de los vientos dominantes.

Las torres de enfriamiento regulan el proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida. Esto se logra cuando se pone la gota en contacto con el aire, evaporando la película exterior, requiriendo para este proceso de absorber calor, el cual se toma de su propia gota, enfriándola consecuentemente. Es decir el enfriamiento se da tanto por calor sensible (cambio de temperatura) y calor latente⁷ (cambio de estado físico).

El objetivo que se persigue en la torre de enfriamiento es que la gota este en mayor contacto posible con el aire, se logra con la altura de la misma y además

⁷ Edward G. Pita, ACONDICIONAMIENTO DE AIRE, México 1994. Pag 188.

interponiendo obstáculos como (el relleno), que va fragmentando la gota y es aquí donde seda al proceso evaporativo.

2.2 Generalidades de un sistema de refrigeración industrial.

En las torres de enfriamiento se consigue disminuir la temperatura del agua caliente proveniente de condensador que mediante la transferencia de calor y materia del aire que circula por el interior de la torre.

A fin de mejorar el contacto aire – agua, se utiliza un entramado denominado relleno. El agua entra por la parte superior de la torre y se distribuye uniformemente sobre el relleno utilizando pulverizadores. De esta forma se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico.

El relleno sirve para aumentar el tiempo de contacto en la superficie del agua con el aire.

La transferencia de calor por convección y la transferencia de vapor desde agua al aire, con el consiguiente enfriamiento del agua debido a la evaporación se obtienen la temperatura deseada al final del proceso. En esta transferencia se produce un flujo de calor en dirección al aire que rodea al agua a causa de la diferencia de temperatura que rodea los diferentes fluidos.

La tasa de enfriamiento por evaporación es de gran magnitud en las torres de enfriamiento; alrededor del 90% es debido al fenómeno difusivo. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial del vapor de agua es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una cesión de vapor de agua (Evaporación).

La diferencia de temperatura del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama “acercamiento o aproximación” ya que representa el limite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua.⁸

⁸ Yunus Cengel, A. G. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México : Cuarta edición.

2.3 Tipos de torres de enfriamiento.⁹

Torres de enfriamiento están diseñadas y fabricadas en varios tipos, con numerosos tamaños y modelos disponibles en cada tipo. No todos los tipos son adecuados aplicación para cada calor cargar configuración. Comprensión de diversos tipos, junto con sus ventajas y limitaciones.

Las torres más comunes son las de tiro natural o hiperbólicas y las de tiro mecánico.

2.3.1 Torres de Tiro Natural o Hiperbólicas

Torres atmosféricas no utilizan ningún dispositivo mecánico o ventilador para crear un flujo de aire a través de la torre. La torre atmosférica pequeña deriva su flujo de aire de la inducción natural (aspiración) proporcionado por un tipo de aerosol de la presión sistema de distribución de agua.

Estas torres generalmente se aplican sólo en muy tamaños pequeños (ver fig. 1) y son mucho más afectados por el adverso condiciones de viento que otros tipos. Su uso en procesos que requieren exacto, confiable no se recomienda temperaturas de agua fría y como tal ha convertido raramente utilizado.

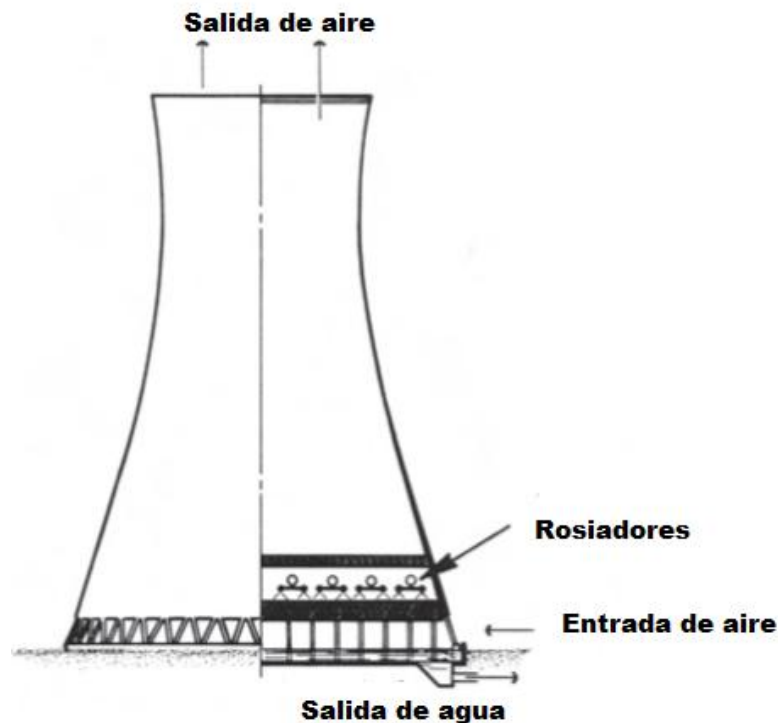


Figura.1 Torre de enfriamiento de tiro natural¹⁰.

⁹ <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2009/03/torres-de-enfriamiento/>

2.3.2 Torres de Tiro Mecánico

Las torres de Tiro Mecánico se dividen en dos tipos de tiro forzado y **tiro inducido a contra flujo**, este último tipo de torre será el que desarrollaremos. Estas Torres se utilizan ya sea solo o con ventiladores múltiples para proporcionar flujo de un volumen conocido de aire a través de la torre. Por lo tanto su rendimiento térmico tiende hacia una mayor estabilidad ya el agua cae sobre las superficies de relleno que ayudan a aumentar el tiempo de contacto entre el agua y el aire esto ayuda a maximizar la transferencia de calor entre los dos, esto la hace más eficiente que las torres atmosféricas.

Las Torres de tiro mecánico tienen grandes ventiladores para forzar o extraer aire a través del agua distribuida.

2.3.2.1 Torres de Tiro Forzado

Torres de tiro forzado se caracterizan por velocidades de entrada de aire altas y velocidades de salida bajas. Por consiguiente, son extremadamente susceptibles a recirculación y por lo tanto se considera que tienen menos estabilidad de rendimiento que la de tiro inducido.

Por lo general, las torres de tiro forzado disponen de un soplador centrífugo tipo ventiladores que, aunque requieran considerablemente más caballos de fuerza que hélice tipo ventiladores, tienen la ventaja de ser capaces de operar contra la alta presión estática asociados con el sistema de conductos. (Ver fig. 2).

¹⁰ Renewable Energy, Department of Mechanical Engineering.

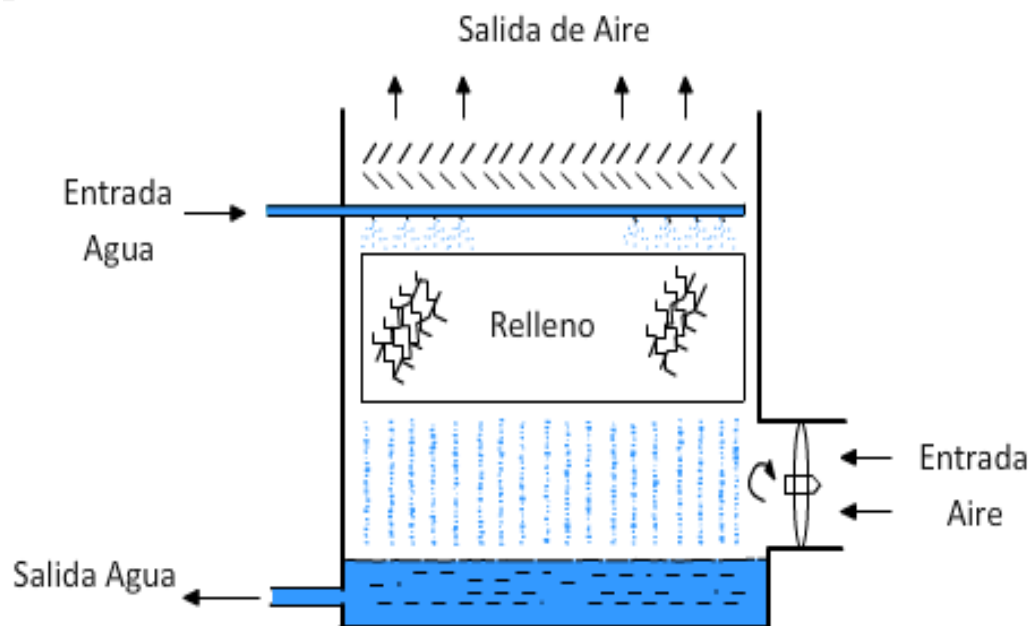


Figura. 2 Torre de enfriamiento de tiro forzado.

2.3.2.2 Torres de Tiro Inducido¹¹

Las torres de tiro inducido (ver fig. 3) el aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Estas torres son las más utilizadas en la industria geotérmica.

Las Torres de tiro inducido tienen una descarga de aire velocidad entre 3 a 4 veces mayor que la velocidad a la entrada, con la aproximación de la velocidad de entrada un viento de 3 m/s. Por lo tanto, hay poca o ninguna tendencia a presión reducida en la zona para crearse en las entradas de aire por la acción el ventilador.

¹¹ <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2009/03/torres-de-enfriamiento/>

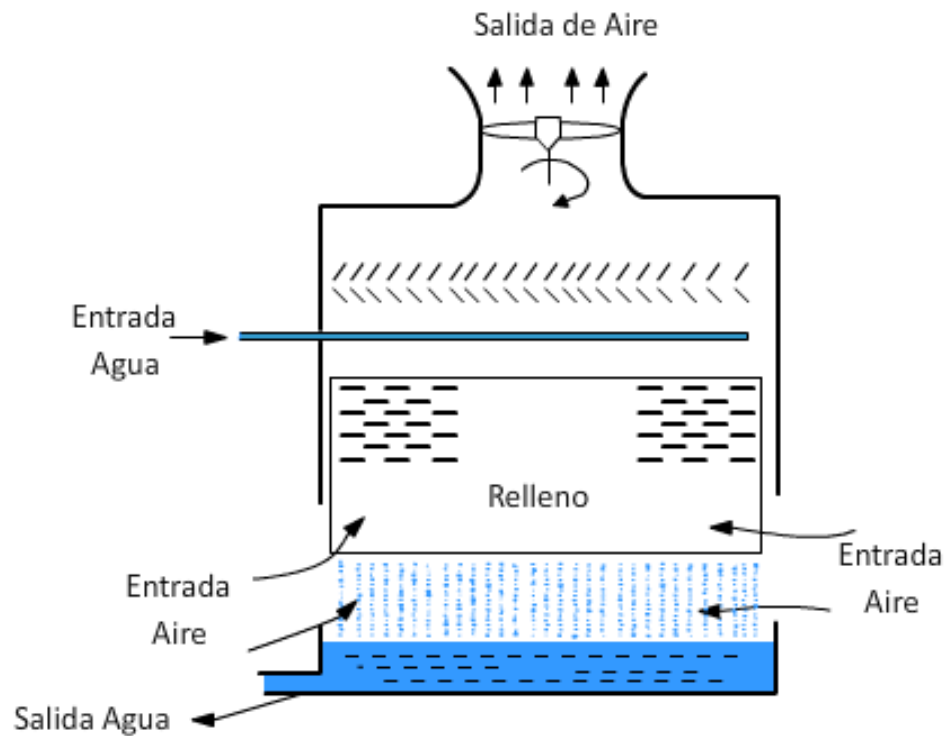


Figura. 3 Torre de enfriamiento de tiro Inducido.

2.3.3 Características de las Torres de Tiro inducido.

A este tipo de Torre se le pueden instalar grandes ventiladores pudiendo mantenerse velocidades y ruidos bajos, el consumo de energía es mucho menor que el de tiro forzado.

En las torres de tiro inducido el aire se mueve verticalmente hacia arriba a través del relleno, en contra de la caída hacia abajo del agua. La velocidad del aire entra a velocidades consideradas pudiendo arrastrar objetos extraños.

Como ya se mencionó la principal función de estos dispositivos es disipar calor, el agua con la que trabajan y desea enfriarse¹² generalmente está entre 40 y 60 °C.

Esta agua es bombeada a la parte superior de la torre y luego fluye hacia abajo en formas de gotas. Luego el aire va hacia arriba que es extraído por ventilador se mezcla con las gotas de agua provocando un enfriamiento de 10 a 15 °C.

¹² Programa de Formación para Profesionales de la Industria Geotérmica, San Jacinto, León – Nicaragua, 2014

Otra parte cuando el agua se mezcla con el aire se evapora provocando emisiones de vapor de agua, es por eso que se puede observar vapor de agua por encima de la torre a esto se le conoce como pluma.

2.4 Factores que afectan el rendimiento de una Torre de Enfriamiento.

Los factores que afectan directamente el rendimiento de la torres es la temperatura de bulbo húmedo y la recirculación de aire saturado (Incropera., 1999.)⁷.

La temperatura a la entrada de la torre es muy significativa ya que es con ésta que se va trabajar, con respecto al rendimiento y la eficiencia de la torre.

Otro punto muy importante a tomar en cuenta es la humedad relativa ya que con este se obtiene la relación de temperatura de bulbo seco y que cuando no se toma en cuenta el rendimiento de la torre es afectado por este parámetro.

El caudal de agua por unidad de tiempo, para el cual se diseña el equipo; se expresa en l/h, m³/h.

La temperatura entre de entrada y salida de la torre o intercambiador es el salto térmico y viene dado por:

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (\text{Ec. 2})$$

La aproximación es la diferencia entre la temperatura de agua a la salida de la torre y la temperatura de bulbo húmedo. Esta temperatura representa el límite de enfriamiento que se puede alcanzar en el lugar de emplazamiento. El agua nunca podrá salir a una temperatura inferior a la del aire saturado, dado que el aire gana calor en el proceso.

$$\Delta T_{\text{LIM}} = T_{2 \text{ AGUA}} - T_{1 \text{ AIRE}} \quad (\text{Ec. 3})$$

La capacidad térmica de refrigeración es la cantidad de calor sensible y calor latente que una torre pueda disipar y se mide en kJ/min.

$$Q_{S \text{ agua}} = \dot{m}_{\text{agua}} C_{\text{agua}} (T_1 - T_2) \quad (\text{Ec. 4})$$

2.5 Condiciones actuales de la torre de enfriamiento¹³.

A partir de la inspección visual se puede conocer el estado general de la torre y posteriormente nos proporcionará la información necesaria para determinar el diagnóstico que requiere para las torres de enfriamiento, por lo tanto se podrá destacar los puntos que son de mayor importancia como:

- Las condiciones actuales de la estructura exterior presentan un estado de oxidación a lo largo de muchos puntos, el cual es debido a que el ambiente que lo rodea es muy abrasivo; ya que los procesos que se llevan a cabo reaccionan con la presencia de gas sulfhídrico que no dejan de estar presente en el medio.



Figura 4. Estructura externa de la torre de enfriamiento.

¹³ Programa de Formación para Profesionales de la Industria Geotérmica, San Jacinto, León – Nicaragua, 2014

➤ **Inspección visual de fuga de agua, de aceite, GNC, ruidos y vibraciones en el circuito de toda la red que llega a los equipos.**

Las fugas, pérdidas o filtraciones que se puedan haber en el circuito me pueden variar la composición química del agua e incluso generar el crecimiento de algas u otros microorganismos, estas variaciones en la calidad del agua pueden disminuir notablemente la transferencia de calor en la torre e incluso facilitar la degradación de los componentes de la torre por oxidación, corrosión o incrustación de elementos extraños en el ducto de la torre de enfriamiento.

No se observó ninguna fuga de agua en la tubería como se muestra en la figura 5, pero se registró al momento de hacer un cambio de aceite se encontró que algunos retenedores de aceite en mal estado, siendo reemplazados por un retenedor en buen estado.



Figura 5. Red de tuberías de la torre de enfriamiento.

➤ **Mal estado de los retenedores en las cajas reductoras.**

Esta variable es de gran importancia porque si los retenedores dejan filtrar aceite mientras esta en operación, habrá obstrucción en los pulverizadores lo que provocara que no haya una buena distribución de agua.

Los retenedores como su nombre lo indica su función es retener el aceite en la caja reductora del ventilador, ayudando a mantener lubricado y en buen estado los sistemas de rodamiento y los engranajes que posee en su interior (**ver anexo figura 1a**)



Figura 6. Caja Reductora con retenedores dañados.

➤ **Suciedad y corrosión en las aspas de los ventiladores.**

Se recomienda que las aspas de los ventiladores estén libres de corrosión y suciedad ya que al momento de estar en operación no estarán evacuando la cantidad de aire necesario para enfriar el agua, lo que afectara al sistema.



Figura 7. Suciedad en las aspas del ventilador.

➤ **Incrustaciones en el relleno**

No se observó ningún problema de suciedad, debido a que recientemente se hizo un mantenimiento a la torre, si existiera algún tipo de obstrucción en el relleno de la torre, de haber suciedad esto perjudicaría el contacto del agua y el aire que circulan en el interior de las torres, debido a que el relleno es el medio para que haya mayor contacto entre el aire y el agua, y al existir suciedad dificultaría el paso del caudal de aire produciendo un inadecuado intercambio de calor entre las dos partes.

En consecuencia a la suciedad u obstrucción aumentaría la potencia del ventilador y la posibilidad de que se produzcan daños; también no existirá la posibilidad de que el aire extraído por el ventilador tuviese energía que pudiese aprovecharse.



Figura 8. Mantenimiento en el relleno de la torre de enfriamiento.

➤ **Estado de la tubería de sistema de distribución del agua condensada.**

Buen estado de la red de tubería proveniente del condensador, no existe fuga que pueda causar problemas o contaminación en el ambiente, la tubería está cubierta de resina que ayuda a disminuir la corrosión que se produce en el ambiente.



Figura 9. Sistema de tubería proveniente del condensador.

2.6 Materiales de construcción de una torre de tiro inducido a contra flujo.

La estructura es el elemento principal de la torre desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, resistencia, y constituye el almacén donde se soportan todos los componentes.

La estructura de una torre de enfriamiento de larga duración tiene que tomarse en cuenta los parámetros en la que va operar, como temperatura del agua, niveles de pH en el agua, temperatura del ambiente y abrasiones que puedan dañar su estructura.

Los requisitos que debemos exigir a los materiales desde el punto de vista de mantenimiento y sanitario, es su resistencia a la acción de biocidas y que eviten el crecimiento de biocapas.

3. Funcionamiento de la Torre.

A continuación haremos una descripción de las especificaciones del funcionamiento actual de las torres en cuestión.

3.1 Sistema de Refrigeración.

El sistema de refrigeración de la torre está compuesto del tipo Evaptech, Inc MODELO #: EC – 548 – 648T; SERIAL #: 10 – 400662. Con las siguientes especificaciones.

3.1.1 Condiciones de Diseño.

➤ Caudal de agua:	2,991.6 m ³ /h
➤ Temperatura de agua caliente:	40.7 °C
➤ Temperatura de agua fría:	30.2 °C
➤ Salto Térmico:	10.5 °C
➤ Temperatura de bulbo húmedo:	26.4 °C

Tabla N° 3. Condiciones de diseño.

3.1.2 Característica general de la torre.

➤ Número de celda:	1 celda
➤ Dimensión de la celda, (m):	73.152 x 14.63
➤ Altura de bombeo (m):	6.90

Tabla N° 4. Características generales de del relleno.

3.1.3 Pérdidas de agua (% caudal circulante).

➤ Por evaporación (m ³ /s):	0.801
➤ Por arrastre (m ³ /s):	0.05
➤ Por purga (m ³ /s):	0.25
➤ Por aporte (m ³ /s , m ³ /d):	1.2 , 1435.96
➤ Arrastre total (m ³ /s):	2.1936

4. Conceptos

Las torres de enfriamiento emplean la misma tecnología que los evaporadores atmosféricos, pero con la diferencia que estas últimas pretenden únicamente la

evaporación, sin buscar un cambio térmico, en cambio evaporadores atmosféricos buscan, un descenso de las temperaturas que se produce para un fluido caliente.

4.1 Conceptos Teóricos.

Las operaciones implicadas en los procesos de interacción agua – aire se basan en la evaporación superficial del líquido⁸. Estos procesos se caracterizan por el hecho que la transferencia de materias está siempre acompañada de transmisión de calor y por tanto su velocidad depende de ambos fenómenos. Así pues, deben conocerse las características del equilibrio como las entalpías del sistema.

La transferencia de materia tiene lugar por mecanismos de difusión y transportes turbulento. Simultáneamente la transmisión de calor tiene lugar por dos mecanismos:

- La transferencia de **calor latente** (Pita., 1994)⁹ debido a la evaporación de una pequeña fracción de agua.
- La transferencia de **calor sensible** debido a la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire.

Aproximadamente el 80% de esa transferencia de calor se debe al calor latente y el 20% al sensible¹⁴.

Con el fin de obtener una velocidad de evaporación elevada, el área de contacto entre el agua y el aire debe ser tan grande como sea posible, suministrando el agua como una fina niebla. Alternativamente el área interfacial puede incrementarse utilizando una columna de relleno. La evaporación tiene lugar si la humedad en la superficie es mayor que en el seno del gas, es decir, la temperatura del agua es superior a la temperatura de rocío del aire. La temperatura de bulbo húmedo es un indicador del contenido de humedad del aire.

Uno de los factores más importantes es el tiempo de contacto entre el aire y el agua, la magnitud de la superficie de relleno y la separación del agua en gotas.

La teoría más aceptada acerca del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento es la de Merkel¹⁵ la cual se basa en la diferencia de potencial de entalpía como fuerza impulsora.

¹⁴Frank. P. Incropera, FUNDAMENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR, cuarta edición, México 1999

¹⁵ Cooling Tower technical Site of Daeil Aqua Co, Ltd.

Definiremos las ecuaciones características de la torre de enfriamiento. Partiendo de los balances de materia y energía.

4.1.1 Balance de macroscópico de Materia

1. Balance global.

A continuación se observa un gráfico donde enseña el balance global que se produce en el sistema de refrigeración.

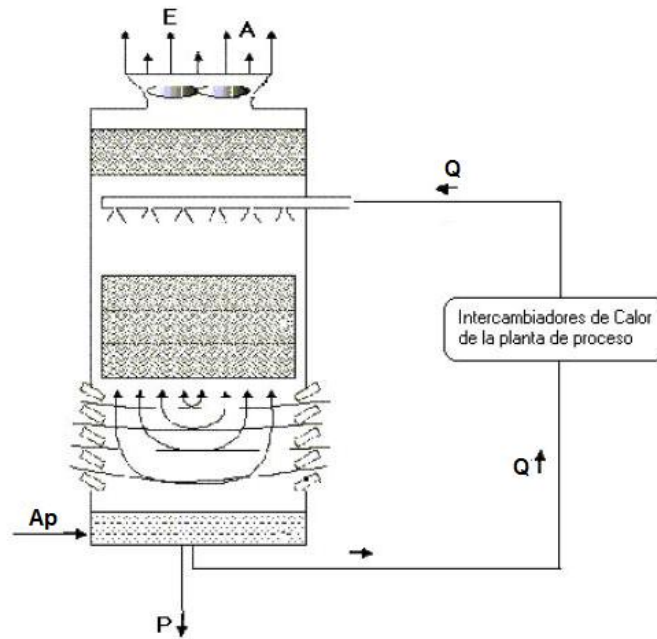


Figura.11 Balance global¹⁶.

Ecuación de balance macroscópico del sistema.

$$A_p = E + A + P \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde: A_p : caudal de aporte (m^3/s).

E : Caudal de evaporación (m^3/s).

A : Caudal de arrastre (m^3/s).

¹⁶ Gas Natural Fenosa, Barcelona – España, <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/torres-de-refrigeracion>

P: Caudal de purga (m^3/s).

El valor de A se calcula teóricamente por considerarse el 0.2 % del caudal circulante (Q) en cual conocemos. Así mismo el caudal conocemos de evaporación (E) lo hayamos mediante la siguiente ecuación en función del salto térmico y el caudal circulante¹⁷.

$$E = \Delta T * 0.00085 * Q * 1.8 \quad (\text{Ec. 6})$$

Por lo tanto, de esta ecuación faltaría conocer el caudal de purga (P), el cual es necesario despejar del balance de materia.

4.1.2 Balance de materia y energía.

Balance de materia.

Supongamos un comportamiento diferencial de la torre de refrigeración de altura dz, al que le realizamos el balance de materia.

Q: caudal de líquido, m^3/h .

G: caudal de aire, m^3/h .

T_1 : temperatura, °C.

Y: humedad relativa (kg de aire / kg de mezcla).

Ecuación del balance de energía.

$$E_{\text{Entrada}} = E_{\text{Salida}} \quad (\text{Ec.7})$$

$$m_1 h_1 + m_{a3} h_{a3} = m_2 h_2 + m_{a4} h_{a4} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Despreciamos el trabajo producido por el ventilador, es decir $W = 0$. Para poder deducir la entalpía y el gasto másico a la salida del agua.

El cambio de entalpía del aire que no contiene humedad durante un proceso se encuentra a partir de la siguiente ecuación:

¹⁷ Balance de Materia y energía, Torres de enfriamiento
http://www.ing.unlp.edu.ar/dquimica/paginas/catedras/iofq813/archivos/CL25_A00_Torre_Enfriamiento_Purga_071214_V0.pdf.

$$\Delta h_{\text{aire seco}} = C_p \Delta T = 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * \Delta T \quad (\text{Ec. 8})$$

El aire atmosférico puede tratarse como una mezcla de gases ideales, cuya presión es la suma de la presión parcial del aire seco (P_a) y la presión de vapor de agua (P_v).

$$P = P_a + P_v \quad (\text{Ec. 9})$$

Dónde:

P_a : presión parcial en (kPa).

P_v : presión de vapor de agua (kPa).

P_T : presión total (kPa).

La masa de vapor de agua presente por unidad de masa de aire seco se llama humedad específica o humedad absoluta (w).

$$w = \frac{0.622 * P_v}{P - P_v} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde P_T es la presión total del aire. $w = (\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg aire seco})$.

El aire que contiene la mayor humedad posible se denomina **aire saturado**. La relación entre la cantidad de humedad que el aire puede contener (m_v), y la máxima cantidad de humedad que el aire puede contener (m_g) a la misma temperatura se denomina **humedad relativa**.

La ecuación viene dada por:

$$Y = \frac{P_v}{P_g} \quad (\text{Ec. 11})$$

O también por,

$$Y = \frac{w * P}{0.622 + w P_g} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde $P_g = P_{sat}$ a T .

La humedad relativa varía de 0 para aire seco hasta 1 para aire saturado.

La entalpía del aire atmosférico se expresa por unidad de masa de aire seco, en vez de hacerlo por unidad de masa de la mezcla aire – vapor de agua, como:

$$h = h_a + w h_g \quad (\text{Ec. 13})$$

En unidades de (kJ / kg aire seco).

Para el cálculo de la destrucción de exergía se tomara en cuenta la temperatura del ambiente, y el calor que disipa el sistema, la destrucción de exergía (X_{dest}) se calcula por la ecuación:

$$X_{dest} = T_0 S_g = T_0 m_a s_1 - s_2 - \frac{Q_L}{T_L} \quad (\text{Ec. 14})$$

Dónde:

$$QL = m_a (h_1 - h_4) \quad (\text{Ec. 15})$$

5. Intercambiadores de calor¹⁸.

“Un intercambiador de calor es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos uno más caliente que otro”. (Yunus Cengel, 2007)¹⁰.

En los sistemas mecánicos, químicos y nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un cuerpo a otro o bien, de un fluido a otro. Estos son dispositivos que permiten realizar esta tarea.

Los intercambiadores pueden estar separados por barreras metálicas o bien estar en contacto directo.

Para cualquiera que sea el tipo de aparato a utilizarlo, si solo se consideran las condiciones de los fluidos de entrada y de salida, se puede establecer un balance térmico escribiendo que la cantidad de calor (Q) perdida en el fluido caliente es

¹⁸ Incropera., F. P. (1999.). FUNDAMENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR. México.: cuarta edición.

igual al que gana el fluido menos caliente, si se desprecian las pérdidas térmicas¹⁹.

$$Q_x = \dot{m}(\Delta h) \quad (\text{Ec. 16})$$

5.1 Tipos de intercambiadores de Calor²⁰.

Para el estudio de los tipos de intercambiadores de calor se pueden realizar diferentes clasificaciones, dependiendo de varios criterios, estos pueden ser de contacto directo o de contacto indirecto.

Los intercambiadores de contacto indirecto o también conocidos como recuperadores están clasificado en:

➤ Tubos concéntricos o tubos doble.

Los intercambiadores de calor de tubos concéntricos o doble tubo son los más sencillos que existen. Están constituidos por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Uno de los fluidos fluye por el interior del tubo de menor diámetro y el otro fluido fluye por el espacio anular entre los dos tubos.

Hay dos posibles configuraciones en cuanto a la dirección de los fluidos: a contracorriente y en paralelo (ver fig.12).

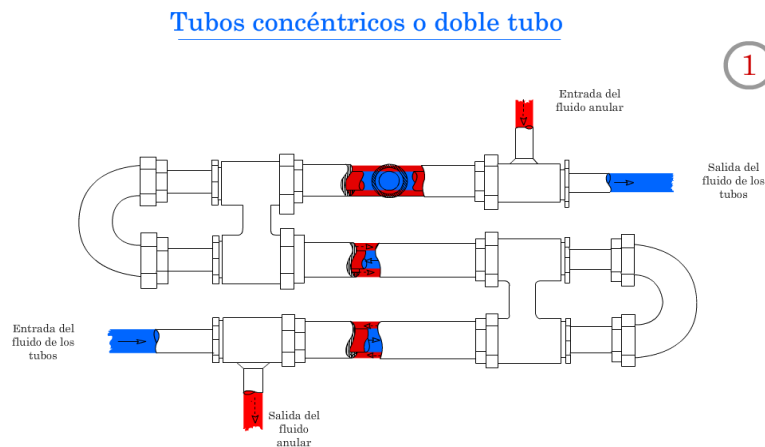


Figura 12. Intercambiador de Tubos concéntricos o dobles tubos.

¹⁹ Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor y Masa, Pag. 630.

²⁰ Incropera., F. P. (1999.). *FUNDAMENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. México.: cuarta edición.

➤ **Coraza y Tubo.**

El intercambiador de calor de coraza y tubos es el más utilizado en la industria. Está formado por una coraza y por multitud de tubos. Se clasifican por el número de veces que pasa el fluido por la coraza y por el número de veces que pasa el fluido por los tubos.

En los intercambiadores de calor de paso múltiple se utiliza un número par de pasos en el lado del tubo y un paso o más por el lado de la coraza (ver fig.13)

Intercambiador de calor de coraza y tubos 1·

1

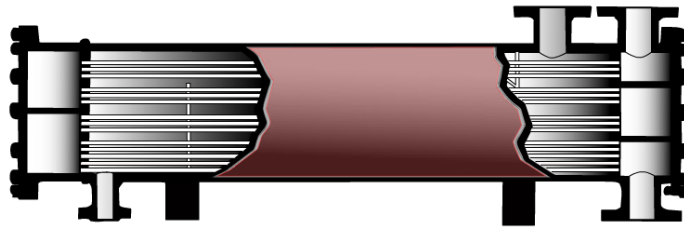


Figura13. Intercambiador de tubo y coraza.

➤ **Evaporadores.**

Un evaporador es un intercambiador de calor de coraza y tubos. Las partes esenciales de un evaporador son la cámara de calefacción y la cámara de evaporación (ver figura 14).

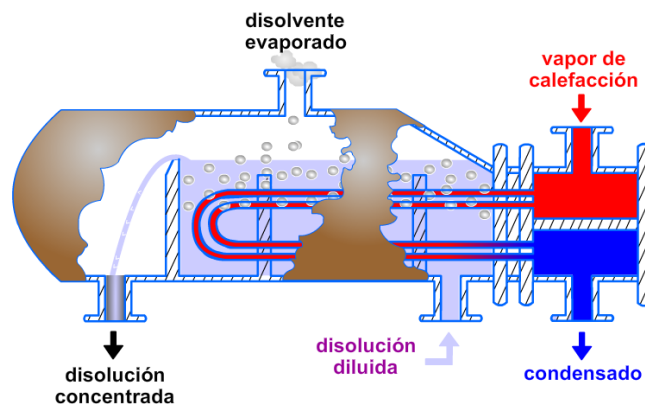


Figura 14. Intercambiador Evaporador.

➤ **Placas.**

Un intercambiador de calor de placas consiste en una sucesión de láminas de metal armadas en un bastidor y conectadas de modo que entre la primera y la segunda placa circule un fluido, entre la segunda y la tercera otro, y así sucesivamente (ver figura 15).

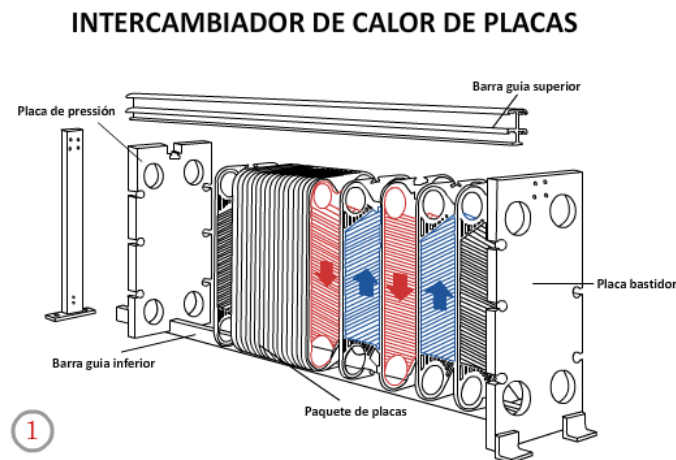


Figura 15. Intercambiador de Calor de Placas.

➤ **Compactos.**

Los intercambiadores de calor compactos están diseñados para conseguir una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen.

En los intercambiadores compactos, los dos fluidos normalmente se mueven en direcciones ortogonales entre sí (ver figura 16)

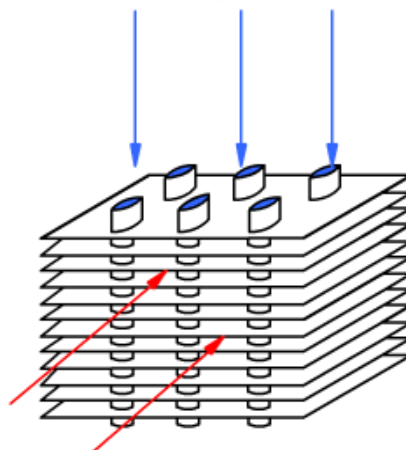


Figura 16. Intercambiador Compacto.

➤ **Intercambiadores de contacto directo²¹.**

También conocido como cambiadores de mezcla, son aquellos en los que los dispositivos en los que los fluidos sufren una mezcla física completa, realizándose, como consecuencia, una mezcla de transferencia de energía completa

A este grupo pertenecen las llamadas torres de enfriamiento o torres húmedas, ya antes mencionadas.

6. VENTILADORES

6.1 Generalidades²².

Los ventiladores son equipos de enfriamiento que es utilizado por las torres para extraer el aire que fluye a través de agua distribuida. Estos ventiladores producen corrientes de aire, es decir, mueven el aire (Industriales, s.f.).

Estos ventiladores están diseñados para resistir condiciones de operación severas, tales como altas temperaturas y presiones. Pueden manejar gases corrosivos con polvo.

6.2 Clasificación.

La primera clasificación de los ventiladores aparece al atender a la trayectoria que sigue el fluido al pasar por ellos, estos se clasifican en:

1. Ventiladores Axiales.
2. Ventiladores Centrífugos.
3. Ventiladores Tangenciales.

La segunda clasificación va en dependencia a su utilización en estas están:

1. Extractores.
2. Impulsores.
3. Tubulares.

²¹ Incropera., F. P. (1999.). *FUNDAMENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. México.: cuarta edición.

²² Ventiladores industriales,
<http://www.quiminet.com/articulos/que-son-los-ventiladores-industriales-15349.htm>

6.2.1 Ventiladores axiales

En este tipo de ventiladores axiales (ver fig.17) el fluido sigue la dirección del rodete estando alineadas la entrada al igual que la salida (Extractores, s.f.)¹¹.

En su forma más simple constan de un rodete con alabes inclinados respecto al eje al que puede ir acoplado directamente el motor, lo que representa ya de entrada una ventaja pudiendo prescindir de correas o de otros órganos de transmisión.

La utilización de ventiladores axiales ha entrado en gran auge por su gran aplicación, trabajando con bajas presiones y grandes caudales. Ha desplazada en muchos casos a los ventiladores centrífugos por no crear cambios perpendiculares en la dirección del aire. Estos ventiladores axiales han bajado notablemente el índice de rozamiento lo cual les ayuda en su rendimiento alcanzando fácilmente del 70 al 80 % y aun en grandes ventiladores se ha llegado al 90%.²⁴

La implementación de ventiladores axiales es que son de bajo costo y de fácil montaje en las estructuras. Otra ventaja es que en caso de emergencia pueden trabajar de forma invertida, haciéndole ganar rápidamente terreno.

Una cualidad de estos ventiladores es que no vibran en comparación a los de otro tipo, por las formas de sus alabes lo cual pueden trabajar con menos ruido, manteniendo velocidades medias y grandes caudales.

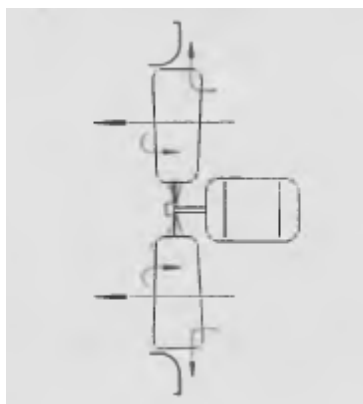


Figura 17. Ventilador axial sin reductor.

²⁴ ventiladores industriales,
<http://www.quiminet.com/articulos/que-son-los-ventiladores-industriales-15349.htm>

6.2.2 Componentes del ventilador axial.

En los componentes del ventilador está primordialmente el motor eléctrico, caja reductora y el acoplador de eje de transmisión.

➤ **Motor eléctrico:**

Se utiliza exclusivamente para conducir los ventiladores de tiro mecánico, y deben ser capaces de un funcionamiento fiable bajo condiciones extremadamente desfavorables para el equipo.

La potencia que entrega por cada ventilador es de 166. 5 KW, uno por cada celda y siendo este capaz de extraer el aire y lo expulsa a la atmosfera (**ver anexos Fig. 2a**).

➤ **Caja reductora:**

La velocidad óptima de un ventilador torre rara vez coincide con la velocidad más eficiente de la controlador (motor). Esto indica que una reducción de velocidad, unidad de transmisión de energía de algún tipo se encuentra entre el motor y el ventilador.

Además de reducir la velocidad del motor a la velocidad adecuado para el ventilador (es la posible pérdida de energía disponible) ya que en la unidad de transmisión de potencia también debe proporcionar primaria soporte para el ventilador.

La relación que el reductor de velocidad tiene es de 15 a 1 mostrada en la chapa del reductor. (Ver figura en anexo 1a)

➤ **Eje de Transmisión:**

El eje transmite la potencia desde la salida eje del motor al eje de entrada del reductor. Por lo que el eje motor opera fuera de la torre, debe ser altamente resistente a la corrosión.

Esté gira a plena velocidad del motor, debe ser bien equilibrado y capaz de volver a ser equilibrado. Transmisión de motor completo energía a distancias significativas, debe aceptar tremenda esfuerzo de torsión sin deformación para que pueda entregar la energía correspondiente al reductor.

Los ejes de transmisión son conocidos como ejes flotantes que son acopladas en ambos extremos, estos ejes son fabricados de acero al carbono, galvanizados que luego de ser fabricados pasan a un baño de agua caliente.

El eje de transmisión para la industria geotérmica (torres de enfriamiento) suelen ser fabricado acero inoxidable.

Es muy importante que la transmisión sea educadamente equilibrada. El desequilibrio no sólo provoca la vibración de la torre, sino también induce al desgaste en el equipo mecánico acoplado al eje. Transmisiones de torre de enfriamiento más grandes operan a la velocidad a 1800 rpm.

7. Condensación.

7.1 Definición de agua Condensada²⁵.

La condensación es el cambio de fase gaseosa, como se puede ser un gas (vapor) a líquido. La condensación generalmente ocurre cuando el vapor se enfría, pero también es enfriada por compresión, es decir, se aumenta la presión (condensación, s.f.)¹².

La condensación se da luego que el vapor es hace su función principal, pasando éste por un dispositivo llamado condensador.

Si bien en el cambio de fase gaseoso a la fase líquida intervienen factores como la **temperatura y la presión**, la condensación se producirá a presiones cercanas al ambiente, mientras tanto, cuando se emplea una sobrepresión excesiva para forzar tal transición, se hablará de **licuefacción**.

Como se ve la temperatura y la presión son los factores que intervienen con el proceso de operación del condensador. Como bien la temperatura de operación del condensado es de 40 °C según los datos obtenidos en campo, en el caso de las torres de enfriamiento de la central geotérmica, luego de haber pasado por el dispositivo condensador. La presión con la el agua condensada es de 2 bar.

²⁵ condensación, q. G. (s.f.). Condensación . Obtenido de <http://www.definicionabc.com/ciencia/condensacion.php#ixzz3ZBRJCX5T>

7.2 Proceso del condensado.

La función del condensador no es más que transformar el vapor proveniente de la turbina en líquido, el vapor entra en condiciones próximas a la saturación, cuando se refiere a saturación decimos que la presión es igual a la de saturación correspondiente a la temperatura de condensación del vapor.



Figura 19. Condensador vista desde el exterior.

El proceso de condensado es regido por los factores como la energía y la entropía, el cambio de fase líquido es más favorable desde el punto de vista energético y la fase gaseosa es más entrópico.

La entropía es todo caso es la magnitud que permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo.

7.3 Licuación o Licuefacción²⁶.

Licuefacción o licuación es el cambio de estado que acontece cuando una sustancia pasa del estado gaseoso al líquido. El proceso ocurre por la acción de la temperatura y el aumento de la presión, que permite llegar a una sobrepresión elevada.

El proceso de condensado es un proceso muy complicado que utiliza diferente compresiones y expansiones para lograr altas presiones y bajas temperaturas.

8. Gases no Condensables²⁷.

El vapor geotérmico se compone principalmente por vapor de agua en alrededor de 99 % de su peso, además contiene otros gases, los cuales son llamados Gases no Condensables (GNC) debido a que su cambio de fase es muy difícil ya que habría que disminuir significativamente su temperatura o aumentar mucho la presión, de tal manera que en los rangos de temperatura y presión a los que opera una planta no se espera su condensación.

Los gases no condensables (GNC) son incapaces de condensarse dentro de un sistema de refrigeración, esto puede traer consigo un grave impacto en las condiciones de funcionamiento del sistema (industriales)¹³.

Los gases más comunes que se encuentran en la atmósfera son el dióxido de carbono CO_2 que es el principal, sulfuro de Hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3), dihidrógeno (H_2), Hidrocarburo (CH_4) monóxido de carbono (CO), etc.

Estos gases tienen un punto de ebullición tan bajo que es imposible su cambio de fase. En el caso de los GNC que salen del condensador son extraídos mediante vacío, y son enviados a otros condensadores que tratan de condensarlos. Una parte es enviada a las torres con el resto del fluido y la otra parte que no condensó por segunda vez es enviada a la atmósfera mediante el ventilador.

La cantidad de GNC que es expulsada por la torre de enfriamiento es de 2,725 kg/h, y salen a una temperatura de 47 °C, datos obtenidos en campo. (Ver figura 20).

²⁶ condensación, q. G. (s.f.). Condensación . Obtenido de
<http://www.definicionabc.com/ciencia/condensacion.php#ixzz3ZBRJCX5T>

²⁷ Eñenry, P. (2014). Programa de Formación para Profesionales de la Industria Geotérmica, . San Jacinto, León – Nicaragua.: Poloris Energy.



Figura 20. Gases no condensables en el sistema.

8.1 Efectos de los GNC en el Sistema.

El vapor debe condensarse en su totalidad en el condensador de lo contrario no permitiría la eficiencia con la que se da la transferencia de calor.

Los GNC al ocupar un área específica en el condensador no permitirán que entre más vapor lo cual no saldrá más líquido y el condensador trabajará ineficientemente.

Otro efecto será el aumento de la temperatura ya que se reduce el área de intercambio de calor y se disminuye el coeficiente de transferencia, lo que significa que habrá mayor presión a la descarga.

Con el aumento de presión, el sistema operará con trabajo adicional lo que provocará, que la eficiencia energética del sistema disminuya. Con el este mismo aumento de presión y temperatura las torres de enfriamiento trabajarán más, para bajarle la temperatura al líquido, como consecuencia habrá más desgaste y consumo energético en el sistema.²⁸

²⁸ Enenry, P. (2014). Programa de Formación para Profesionales de la Industria Geotérmica, . San Jacinto, León – Nicaragua.: Poloris Energy.

9. Fluido Circulante.

Se denomina fluido (factores-ambientales)¹⁴ a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas sólo hay una fuerza de atracción débil.

Este flujo de vapor condensado al mezclarse con agua de enfriamiento se convierte en una mezcla que contiene impurezas, principalmente proveniente del entorno y gases disueltos del sistema.

El fluido puede contener materiales inertes o reactivos.

El fluido que es enviado del condensador a las torres de enfriamiento mediante bombas, luego la torre enfría el agua condensada que luego cae en una pila esta agua tiene una temperatura similar a la del medio ambiente de 30.2

9.1 Parámetros de circulación.

Anterior mente se mencionaron los estos parámetros que son de gran relevancia para el caudal de circulación del agua que pasa por la torre de enfriamiento.

➤ Reposición (M):

Es el caudal de agua que circula por el sistema, dando el servicio de enfriamiento esperado.

➤ Purga (Pg):

Es en función de los ciclo de concentración.

➤ Ciclos de concentración:

Los ciclos de concentración son la relación de la concentración de sólidos en el agua de aporte. Los sólidos que llegan al agua de aportación irán reaccionando con el material en contacto, el aire, bacteria que se encuentran en la torre.

Al concentrarse puede aumentar progresivamente hasta el extremo de convertirse en incrustaciones que luego forman barreras que no permiten el paso al fluido.

Para evitar esto se realiza la purga o sangrado del agua que retira el alto índice de concentración y provoca mucha agua más fresca.

➤ **Recirculación (R):**

Es el agua que enfría el nuevo caudal que entra a la torre de enfriamiento, logrando que éste se condense enviándolo a los distribuidores que están por encima de la torre de enfriamiento.

➤ **Evaporación (E):**

Este fenómeno se da mediante la acción de los ventiladores, esta es otra forma de arrastre que las gotas en formas de aerosoles son enviadas a la atmosfera por la extracción del ventilador.

➤ **Arrastre (A):**

Este es considerado como pérdida por arrastre mecánico, siendo esta pérdida de naturaleza igual que la purga por lo tanto poseerá igual concentraciones de sales. Las pérdidas por arrastre constituyen el 0.05% a 0.1% del caudal de agua circulante esto varia conforme a la eficiencia de los separadores de agua.

9.2 Tratamiento del agua.

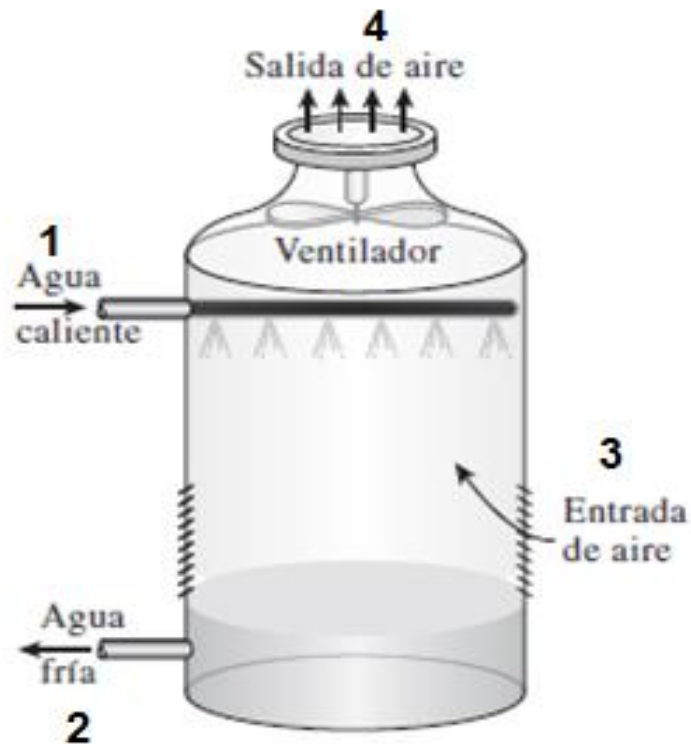
En cuanto al tratamiento químico del agua, éste es realizado por la empresa, así como para suministrar los reactivos que sean necesarios para lograr que el agua posea una característica química tal que no sea corrosiva ni que posea incrustaciones, estos productos químicos son suministrados al agua en continuo, en función del flujo suministrado.

Memoria de Cálculo.

Estados de la torre de enfriamiento

Estados	T(°C)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)	w (kg H ₂ O / kg de aire seco)	Humedad relativa (%)	Presión (kPa)	Flujo másico. (kg/s)
1	40.7	170.45		0.0518			2182334
2	30.2	94.50		0.0251			
3	29	63.13		0.0133	53		
4	40	166.46		0.0490	100		

Tabla N° 5 Datos experimentales.



Calculo del estado 3

$$T = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 53 \%$$

a) Calculo de la presión parcial.

$$P_v = Y * P_{\text{sat a } 29}$$

$$P_v = 0.53 * 3.9704$$

$$P_v = 2.1043 \text{ kPa.}$$

Por lo tanto,

$$P_a = P - P_v$$

$$P_a = 100 - 2.1043$$

$$P_a = 97.8956 \text{ kPa.}$$

b) Calculo de la humedad absoluta.

$$w = \frac{0.622 * P_v}{P_a}$$

$$w = \frac{0.622 * 2.1042 \text{ kPa}}{97.8956 \text{ kPa}}$$

$$w = 0.0133 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg de aire seco}}$$

c) Calculando el volumen de aire seco.

$$V = \frac{Ra * T}{P_a}$$

$$V = \frac{0.287 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * 302.15 \text{ }^{\circ}\text{K}}{97.8956 \text{ kPa}}$$

$$V = 0.8580 \frac{\text{m}^3}{\text{kg de aire seco}}$$

d) La entalpía de vapor de aire por unidad de masa de aire seco está determinada por la ecuación:

$$H = H_a + w * H_g$$

O bien, H_g ven en tabla A-4 en anexo,

$$H = C_p T + w * H_g$$

$$H = (1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (29 ^\circ\text{C}) + (0.0133 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg de aire seco}} * 2555.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$H = 63.13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Verificamos los datos con ayuda de la carta de humidificación ver anexo figura 22.

Estado 4:

Datos

$$T = 40 ^\circ\text{C}.$$

$$Y = 100 \%$$

a) Calculando de la presión parcial:

$$P_v = Y * P_{\text{sat a } 40}$$

$$P_v = 0.99 * 7.3851$$

$$P_v = 7.3112 \text{ kPa.}$$

Por lo tanto,

$$P_a = P - P_v$$

$$P_a = 100 - 7.3112$$

$$P_a = 92.6887 \text{ kPa.}$$

b) Calculo de la humedad absoluta.

$$w = \frac{0.622 * P_v}{P_a}$$
$$w = \frac{0.622 * 7.3112 \text{ kPa}}{92.6887 \text{ kPa}}$$
$$w = 0.0495 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg de aire seco}}$$

c) La entalpía de vapor de aire por unidad de masa de aire seco está determinada por la ecuación:

$$H = C_p T + w * H_g$$
$$H = (1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (40 ^\circ\text{C}) + (0.0495 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg de aire seco}} * 2573.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$
$$H = 167.5882 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Estado (1)

$$T = 40.7 ^\circ\text{C}.$$

$$\dot{m} = 2182334 \text{ kg/h}$$

$$Q = 2200 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P = 0.2 \text{ MPa}.$$

Datos obtenidos mediante la tabla N° 7 de líquido comprimido.

$$C_p = 1.005 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$$

$$\rho = 991.92$$

Mediante la tabla de agua líquida comprimida (ver anexo) obtenemos directamente las propiedades del estado 1.

$$H = 170.6337 \text{ kJ / kg}.$$

$$S = 0.5814 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{K}$$

Estado (2)

$$T = 30.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P = 1 \text{ atm.}$$

$$Q = 2102.07 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho = 995.1 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 94. \text{ kJ/ kg}$$

Calculando el flujo másico del agua de salida

$$m = \rho * Q$$

$$m = 995.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2102.07 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$m = 2,091,765.2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

CARGA TÉRMICA DEL AGUA y AIRE POR CALOR SENSIBLE.

El caudal de líquido condensado que es enviando a la torre de enfriamiento es de 11,000 m³/ h, con una temperatura de 40.7 °C, y con un gasto másico de 2,182,334 kg/h.

La carga térmica por calor sensible viene dada por la ecuación:

$$Q_{IN} = \rho_{aire} C_{p\ aire} (T_1 - T_2)$$

$$Q_{IN} = 2587680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{60\text{min}} 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{C}} 40 - 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{IN} = 476780.04 \text{ KJ/min}$$

$$Q_{IN} = \rho_{agua} C_{p\ agua} (T_1 - T_2)$$

$$Q_{IN} = 2182334 \frac{kg}{h} * \frac{1h}{60min} 1.88 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} 40.7 - 30.2 ^\circ C$$

$$Q_{IN} = 717987.886 KJ/min$$

CARGA TÉRMICA DEL AIRE Y EL AGUA POR CALOR LATENTE.

$$Q_{L\ aire} = 0.68 * CFM_{aire} * (w_4 - w_3)$$

Donde el flujo másico del aire es 136.94 m³/s, convirtiéndolo a pies cúbicos por minutos (CFM) es:

Donde 1 m³/h = 35.3146 CFM

$$Q_{L\ aire} = 0.68 17409565.75 \frac{ft^3}{h} * \frac{1h}{60\ min} 0.049 - 0.014$$

$$Q_{IN\ aire} = 6905.7942 Btu/min.$$

$$Q_{L\ aire} = 7285998.4418 \frac{J}{min} \approx 7285.9984 \frac{kJ}{min}$$

CALOR TOTAL.

$$Q_T = Q_S + Q_L$$

$$Q_T = Q_{S\ AIRE} + Q_{S\ AGUA} + Q_{L\ AIRE}$$

$$Q_T = 476780.04 \frac{KJ}{min} + 717987.886 \frac{KJ}{min} + 7285.9984 \frac{kJ}{min}$$

BALNACE DE ENERGIA

$$mh_{in} = mh_{out}$$

$$m_1 h_1 + m_{a3} h_{a3} = m_2 h_2 + m_{a4} h_{a4}$$

$$m_1 h_1 = m_2 h_2 + m_a (h_{a4} - h_{a3})$$

Donde la evaporación es:

$$\dot{m}_2 = m_1 - m_a (w_4 - w_3)$$

$$\dot{m}_2 = 2182334 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 2587680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad 0.049 - 0.014$$

$$\dot{m}_2 = 2,091,765.2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Calculo de destrucción de exergía:

$$X_{dest} = T_0 S_g$$

$$X_{dest} = T_0 m_{aire} S_4 - S_3 - \frac{Q_L}{T}$$

$$X_{dest} = 302^\circ K \left(2587680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} \right) 1.7446 - 1.7087 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ K}$$

$$- \frac{7285.9984 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}}{302 ^\circ K}$$

$$X_{dest} = 460299.15 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}$$

Calculando la velocidad de salida del flujo de aire.

Conociendo el diámetro de salida del aire conoceremos el área por la cual atraviesa el flujo de aire.

Conoceremos la velocidad usando la ecuación de flujo volumétrico:

$$Q = V * A$$

En la cual despejaremos la velocidad,

$$V = \frac{Q}{A}$$

La velocidad va estar en función del el caudal y el área y su unidad de media será metros por segundo (m/s).

Calculando la velocidad tenemos que:

$$Q_{\text{aire}} = 492984 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$D = 10 \text{ m}, R = 5 \text{ m}$$

Donde el área será, $\pi D^2/4$

$$V = \frac{492984 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\frac{\pi * 10 \text{ m}^2}{4}}$$

$$V = 6276.86 \frac{\text{m}}{\text{h}} \approx 1.74 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

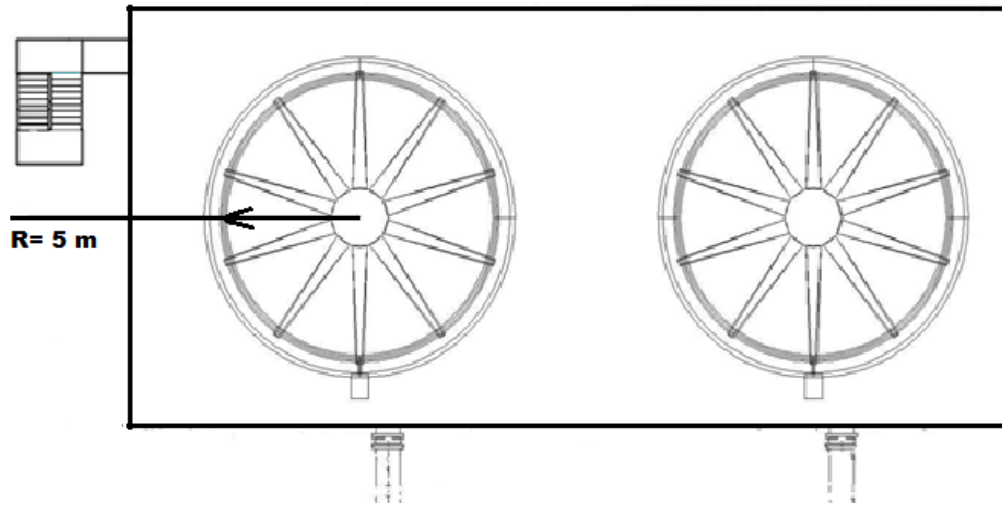


Figura 21. Vista superior de la torre.

Calculando la potencia para la turbina tomando en un punto arbitrario:

$$P = \rho * A * V^3$$

Se tomará la mitad del radio, teniendo en cuenta que en los extremos la velocidad es cero.

Donde el área es igual a:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Sustituyendo en la ecuación de la potencia tenemos que,

$$P = \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * V^3$$

$$P = 1.2 \text{ kg/m}^3 * \frac{\pi * 5\text{m}^2}{4} * (1.74 \text{ m/s})^3$$

$$P = 124.12 \text{ W} \cong 0,1241 \text{ kW}$$

Esta es la potencia disponible a la salida de los gases producto de su energía cinética, y por lo tanto, la energía disponible para la instalación de una posible turbina eólica de eje vertical. Calcularemos cuanto generar por día y año.

$$P = 0,1241 \text{ kW} * 24 \text{ h}$$

$$P = 2.9784 \text{ kWh}$$

Esto es lo que generaría por día $P = 2.9784 \text{ kWh}$. Al año (310 días) daría 923.304 kWh.

10. Conclusiones.

Hoy más que nunca, el éxito económico de cualquier empresa requiere el uso eficiente de energía en los procesos de que se trate, la conservación de energía consecuentemente, enfrenta un fuerte incentivo en el criterio de diseño, características de construcción y operación comúnmente usadas en las torres de enfriamiento.

1. Se puede destacar que en el desarrollo de este estudio se logró verificar que las torres de enfriamiento se encuentran en óptimas condiciones de operación, ya que no se encontró fugas en la red de tubería de agua, ni señales de corrosión en la estructura, los equipos mecánicos que posee la torre se encuentran en buen estado como es el ventilador que puede extraer el aire sin problema alguno, el motor eléctrico mantiene su velocidad constante haciendo girar al ventilador; también se puede concretar que no hay ningún tipo de incrustación en el relleno que dificulte el paso de aire por la torre.
2. Al calcular teóricamente la carga térmica se verificó que las torres de enfriamiento tienen la capacidad evacuar el calor del agua y como efecto disminuir la temperatura de la misma de 40.7 °C a la entrada a 30.2 °C a la salida, logrando enfriar 10.5 °C. En la realidad la torre de enfriamiento realiza de manera óptima el intercambio de calor entre el flujo de agua y el flujo de aire, permitiéndole llevar a cabo su función la cual es enfriar el agua.
3. Como sabemos en todo proceso siempre hay pérdidas de energía y en las torres de enfriamiento no es la excepción, al analizar el aire se puede decir que existe exergía en forma de energía cinética la cual es de 1.74 m/s y a una temperatura de 40 °C, que está siendo liberada a la atmósfera.
4. Los resultados obtenidos muestran que las torres de enfriamiento pueden generar energía limpia con el aire que es expulsado por los ventiladores, la potencia que generaría es 1.24×10^{-4} MW, que representa el 0.0002% de la potencia instalada actualmente en la empresa, por lo que se considera innecesario continuar con estudios de investigación para el aprovechamiento de esta energía a través de generadores eólicos.

11. Recomendaciones.

1. Seguir el plan de mantenimiento de la torres de enfriamiento que proporciona el fabricante para así darle una vida útil más prolongada tanto a las estructura como a los componentes que la conforman.
2. Para haya una mejor transferencia de calor entre ambos fluidos es necesario realizar mantenimiento preventivos para ayuden a mejorar el contacto entre el agua y el aire, y así evitar la incrustación en el relleno que no permitan paso al aire de forma fluida y como consecuencia no se podría conseguir bajar la temperatura al agua.
3. Es importante destacar que se puede reutilizar el aire para generar energía limpia como un subproceso; pero esto no generaría un impacto económico y ambiental a la empresa, por lo cual no sería una opción el aprovechamiento de la exergía liberada por las torres.
4. Recomendamos a la empresa no realizar inversiones en equipos eólicos para la cogeneración de energía eléctrica ya que los mismos tienen costos elevados y el potencial aprovechable en las torres es muy bajo.

ANEXOS

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292

Tabla Nº 6 (A- 4) de agua saturada.

TABLA A-7

Agua líquida comprimida

T °C	v m^3/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s $kJ/kg \cdot K$	v m^3/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s $kJ/kg \cdot K$	v m^3/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s $kJ/kg \cdot K$
$P = 5 \text{ MPa (263.94 °C)}$					$P = 10 \text{ MPa (311.00 °C)}$				$P = 15 \text{ MPa (342.16 °C)}$			
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603	0.0016572	1585.5	1610.3	3.6848
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001	0.0009952	0.12	10.07	0.0003	0.0009928	0.18	15.07	0.0004
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954	0.0009973	83.31	93.28	0.2943	0.0009951	83.01	97.93	0.2932
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705	0.0010035	166.33	176.37	0.5685	0.0010013	165.75	180.77	0.5666
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287	0.0010127	249.43	259.55	0.8260	0.0010105	248.58	263.74	0.8234
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723	0.0010244	332.69	342.94	1.0691	0.0010221	331.59	346.92	1.0659
100	0.0010410	417.65	422.85	1.3034	0.0010385	416.23	426.62	1.2996	0.0010361	414.85	430.39	1.2958
120	0.0010576	501.91	507.19	1.5236	0.0010549	500.18	510.73	1.5191	0.0010522	498.50	514.28	1.5148
140	0.0010769	586.80	592.18	1.7344	0.0010738	584.72	595.45	1.7293	0.0010708	582.69	598.75	1.7243
160	0.0010988	672.55	678.04	1.9374	0.0010954	670.06	681.01	1.9316	0.0010920	667.63	684.01	1.9259
180	0.0011240	759.47	765.09	2.1338	0.0011200	756.48	767.68	2.1271	0.0011160	753.58	770.32	2.1206
200	0.0011531	847.92	853.68	2.3251	0.0011482	844.32	855.80	2.3174	0.0011435	840.84	858.00	2.3100
220	0.0011868	938.39	944.32	2.5127	0.0011809	934.01	945.82	2.5037	0.0011752	929.81	947.43	2.4951
240	0.0012268	1031.6	1037.7	2.6983	0.0012192	1026.2	1038.3	2.6876	0.0012121	1021.0	1039.2	2.6774
260	0.0012755	1128.5	1134.9	2.8841	0.0012653	1121.6	1134.3	2.8710	0.0012560	1115.1	1134.0	2.8586
280					0.0013226	1221.8	1235.0	3.0565	0.0013096	1213.4	1233.0	3.0410
300					0.0013980	1329.4	1343.3	3.2488	0.0013783	1317.6	1338.3	3.2279
320									0.0014733	1431.9	1454.0	3.4263
340									0.0016311	1567.9	1592.4	3.6555

Tabla Nº 7 (A -7) de agua líquida comprimida.

TABLA A-17

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344

Tabla N° 8 (A – 17) Propiedades de gas ideal aire.

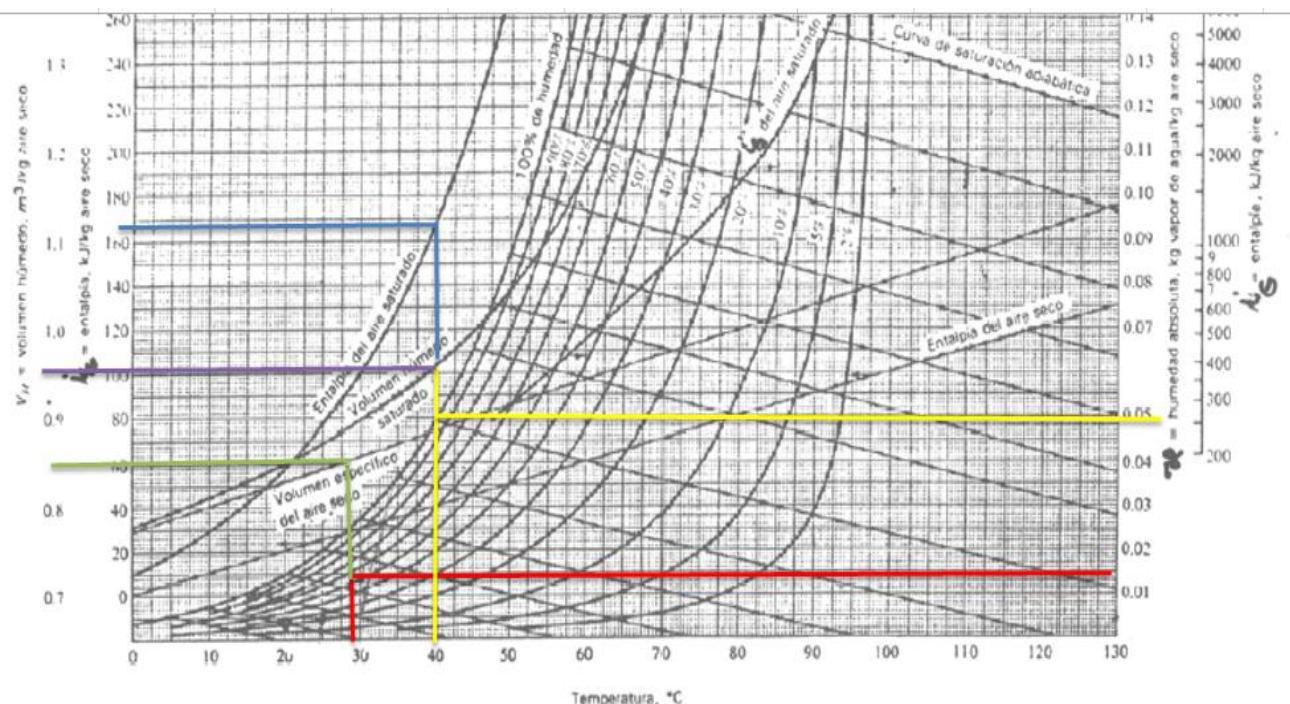


Figura 22. Diagrama de humidificación.

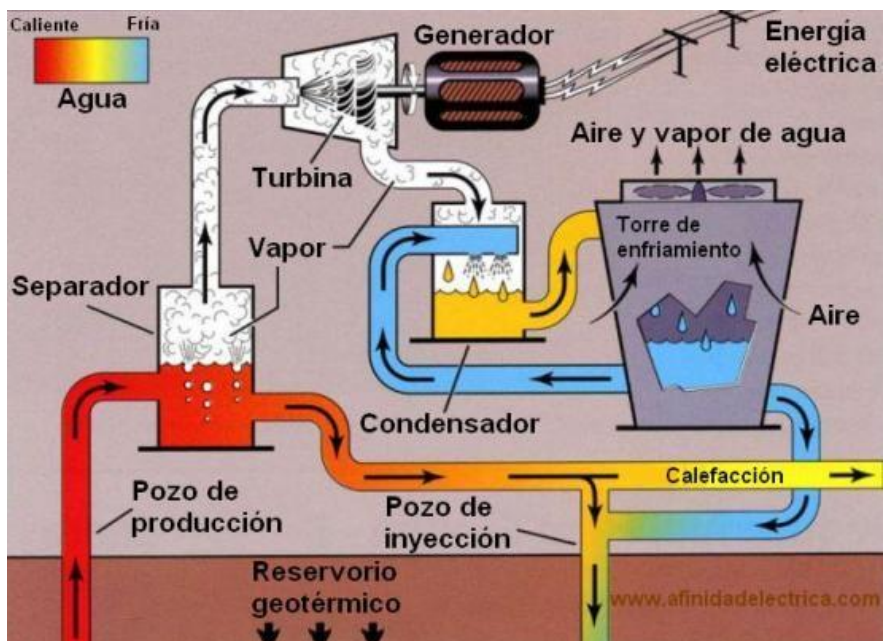


Figura 23. Ciclo orgánico simple de una planta geotérmica.

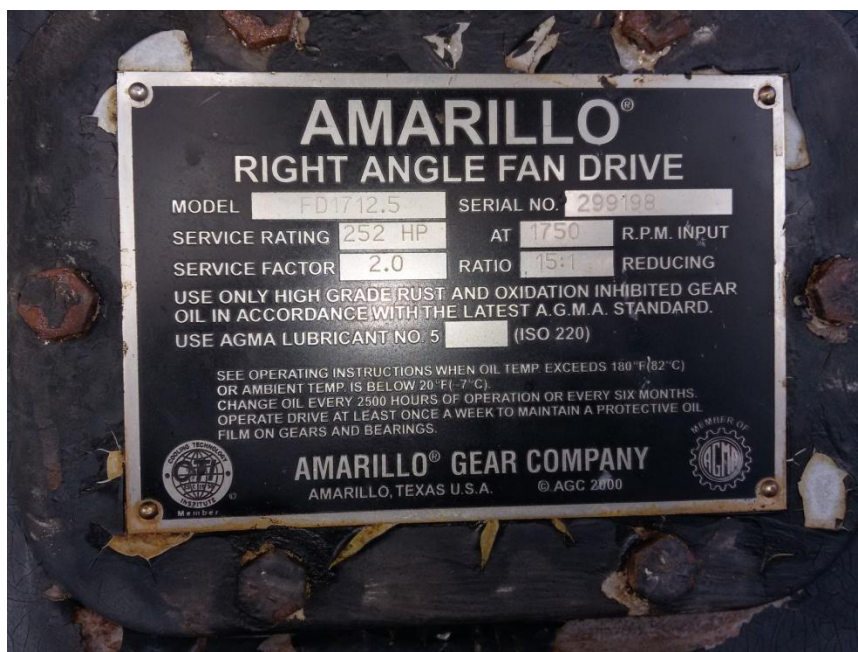


Figura. 23 Modelo y serie del reductor de velocidad de la torre de enfriamiento.

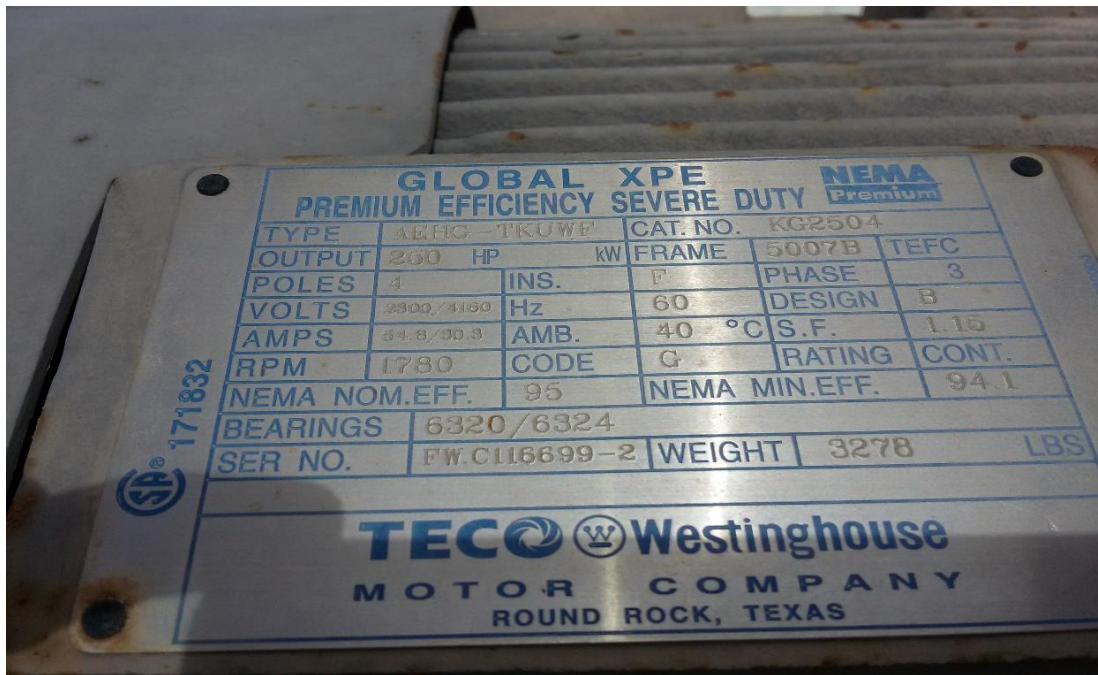


Figura. 24 Placa del motor de la torre de enfriamiento.



Figura. 25 Red de salida de los gases no condensables.



Figura 26. Mal estado de los retenedores de aceite de la caja reductora

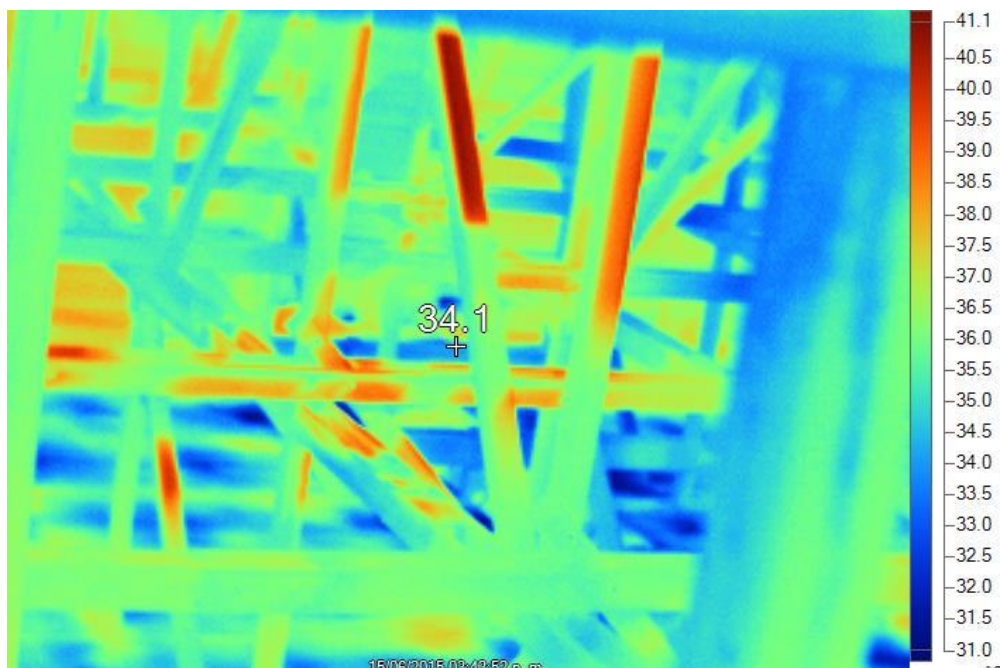


Figura 27. Temperatura del agua que pasa por la estructura interna.

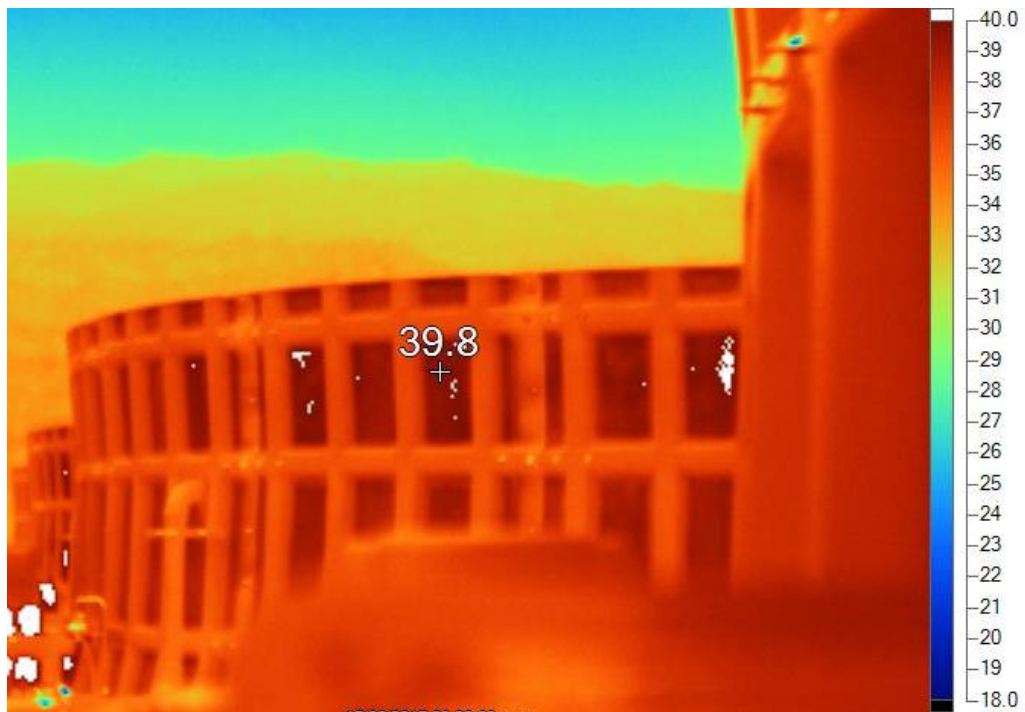


Figura. 28 Temperaturas del gas (aire) a la salida.



Figura 29 Cámara termografía.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividades	Br. Franklin Javier Torrez Rios																				
	Meses																				
	Junio		Julio				Agosto			Septiembre				octubre				Noviembre			Dic
	S- III	S- IV	S- I	S- II	S- III	S- IV	S- I	S- II	S- III	S- I	S- II	S- III	S- IV	S- I	S- II	S- III	S- IV	S- I- II	S- III	S- IV	S- I- II
Recopilación de información																					
Redacción de protocolo																					
Introducción, Objetivos, Antecedentes, Justificación, hipótesis, planteamiento de problema, variable.																					
Desarrollo de Marco Teórico																					
Entrega y revisión de borrador																					
Revisión del protocolo																					
continuación del Marco Teórico																					
medición en campo (torre de enfriamiento)																					
cálculos teóricos de carga térmica, y velocidad de salida del ventilador																					

Redacción de conclusión y Recomendación																				
Entrega del Borrador																				
Revisión de borrador																				
Entrega de la Tesis																				
Corrección de la tesis																				
Defensa Final																				

12. Bibliográficas.

- condensación, q. G. (s.f.). *Condensación* . Obtenido de
<http://www.definicionabc.com/ciencia/condensacion.php#ixzz3ZBRJCX5T>
- Electricidad, E. N. (s.f.). *enel*. Obtenido de
http://www.enel.gob.ni/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=16&Itemid=2
- Enenry, P. (2014). *Programa de Formación para Profesionales de la Industria Geotérmica*, . San Jacinto, León – Nicaragua.: Poloris Energy.
- Extractores. (s.f.). *Ventilación* . Obtenido de
<http://extractores.com.mx/ventiladores%20axiales.htm>
- factores-ambientales. (s.f.). *Temperatura*. Obtenido de <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/temperatura>
- Geotérmica, E. (s.f.). *tw energy*. Obtenido de <http://twenergy.com/energia/energia-geotermica>
- Haywood, R. W. (1986). *Análisis Termodinámico de Plantas Eléctricas*. R. W. Haywood. Primera edición, (. México: LIMUSA.
- Incropera., F. P. (1999.). *FUNDAMENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. México.: cuarta edición.
- industriales, r. (s.f.). Obtenido de <http://www.refrigerants.com/pdf/NRInews-Smr11.pdf>
- Industriales, V. (s.f.). *Ventiladores Industriales*. Obtenido de
<http://www.quiminet.com/articulos/que-son-los-ventiladores-industriales-15349.htm>
- Minas, M. d. (s.f.). Obtenido de www.mem.gob.ni:
<http://www.mem.gob.ni/media/file/DIRECCION%20DE%20RECURSOS%20ENERGETICO>
- Pita., E. G. (1994). *ACONDICIONAMIENTO DE AIRE*. México : primera edición.
- renovables, E. (2015). *Energías Renovables*. Obtenido de 2. <http://www.pronicaragua.org/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/969-mas-energia-renovable-en-la-matriz-energetica-de-nicaragua>
- Yunus Cengel, A. G. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México : Cuarta edición.

